

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

**ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением  
и родственные процессы»  
(наименование)

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

(код и наименование направления подготовки)

«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических  
неорганических материалов»  
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Плазменная сварка алюминия пульсирующей дугой переменного  
тока»

Студент

**М.В. Миронов**

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_  
(личная подпись)

Научный

руководитель

д.т.н. профессор **В.П.Сидоров**

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Энергетические характеристики дуги в аргоне.....	6
1.1. Строение сварочной дуги постоянного тока.....	6
1.2. Свободная однофазная дуга переменного тока.....	8
1.3. Сварка трехфазной дугой.....	13
1.4. Сжатая дуга.....	21
1.5. Сжатая однофазная дуга переменного тока.....	35
1.6. Сжатая трехфазная дуга.....	37
1.7. Дуги с разнополярными импульсами прямоугольной формы...	39
1.8. Модуляция сварочного тока как метод импульсного управления технологическими свойствами дуги.....	41
1.9. Распространение тепла при импульсной сварке тонколистовых деталей .....	47
1.10 Методы расчета энергетических характеристик сжатой дуги в среде аргона.....	50
1.11 Задачи работы.....	52
2. Экспериментальное оборудование и методики исследований.....	53
2.1 Установка для проведения экспериментальных исследований..	53
2.2. Экспериментальные плазмотроны.....	58
2.3. Сварочные материалы.....	64
3. Исследование технологических свойств сжатой пульсирующей сварочной дуги в аргоне переменного тока.....	67
3.1. Влияние длины дуги на ширину зоны катодного распыления и ширину шва.....	67
3.2. Исследование разрывной длины дуги. ....	73
3.3. Зависимость напряжения от длины открытого участка дуги....	76
3.4. Исследование структуры сварного шва.....	77
4. Исследование тепловых характеристик сжатой пульсирующей дуги переменного тока .....	83

4.1	Определение приведенных характеристик источника тепла для условий пульсирующей дуги переменного тока.....	83
4.2.	Исследование влияния параметров модели на размеры точки.	85
4.3.	Определение коэффициентов $\alpha$ и $K_1$ на основе наплавки точек	88
4.4	Алгоритм расчета температур в пластине при сварке пульсирующей дугой.....	91
	Заключение.....	97
	Список используемой литературы.....	98

## Введение

Инновационное машиностроение характеризуется широкой полнотой используемых способов обработки, которые были использованы, в том числе и в плазменных (сварки, резки, наплавки, напыления, поверхностного упрочнения, легирования и т.п.). Непрерывно повышающиеся запросы к качеству обработки и иным ее признакам настоятельно просят функционального управления действиями плазменной отделки с целью рационального с точки зрения свойства, ресурсо- и энергосбережения при применении сжатой сварочной дуги, как главного принципиального прибора научно-технического процесса. Наверное может быть только на базе исследования теоретических основ управления научно-техническими качествами сварочной дуги [10].

В настоящее время классические стационарные процессы плазменной обработки, которые были использованы фактически израсходовали собственные научно-технические способности. Творение новейших научно-технических действий, методик управления ими и немаловажное улучшение имеющихся может быть только на базе исследования и применения телесных параметров сжатой дуги и свойственных ей закономерностей [47].

Находят все более массовое применение другие быстро возникающимися плазменные методы - сварка, наплавка слоев со особыми свойствами, укрепление поверхности. Часто эффективному использованию плазменных методов сдерживает недостаток систематизированных данных о правилах и возможностях соответствующих технологических методов, что затрудняет выбор оптимальной методики для решения конкретных производственных задач, назначение систем обработки, прогнозирование данных [47].

Итоги тестирований разных параметров стационарной сжатой сварочной дуги довольно много представлены в литературе. Они обширно применялось при исследовании и совершенствовании плазменных установок для разных научно-технических действий, работающих в стационарном

режиме. Существенно наименее выученными считаются физиологические и научно-технические характеристики нестационарных (импульсных) сжатых сварочных дуг [29]. Потому одним из многообещающих направлений решения указанной больше базовой трудности плазменной отделки, которые были использованы считаются тесты, нацеленные на обнаружение связей меж импульсным конфигурацией тока и физиологическими и научно-техническими качествами импульсных ужатых сварочных дуг. Данные тесты имеют все шансы стать теоретической основанием для сотворения новейших и улучшения обычных плазменных действий, а еще раскрыть большие способности для их управления.

На основании изложенного можно констатировать, что дальнейшие испытания и разработки в указанном направлении с целью разработки научных основ импульсного управления технологическими свойствами сжатой сварочной дуги представляются важными и актуальными.

## **1 Энергетические характеристики дуг в аргоне**

### **1.1 Строение сварочной дуги постоянного тока**

Электрическая дуга дает собой один из видов электрических разрядов в газах, при котором имеется протекание электрического тока проходящих через газовый просвет перед действием электрического поля. Электрическую дугу, применяемую для сварки металлов, именуют сварочной дугой. Сварочная цата считается долею электрической цепи, дает собой нелинейное омическое противодействие и на ней проистекает снижения напряжения. При сварке на неизменном токе антикатод, законнекченный к позитивному полюсу родника кормления дуги, именуют анодом, а к отрицательному – катодом[8]. Ежели сварка проводится на переменном токе, любой из электродов считается попеременно то анодом, то катодом. Просвет меж электродами именуют областью дугового разряда либо дуговым интервалом. Длиной дугового интервала именуют кратчайшее просвет меж электродами. Дуга, пылающая меж стержневым электродом и объектом сварки, присоединенным к роднику кормления, считается дугой прямого действия. Ежели токоведущее разрез таковой дуги никак не сдерживают каким-или образом, то эту дугу принято именовать вольной дугой в различие от сжатой, поперечное разрез которой понудительно убавляют из-за счет сопла особой горелки, потока газа, электромагнитного поля [8].

По длине дугового промежутка дуга разделяется на три области (рис.1).

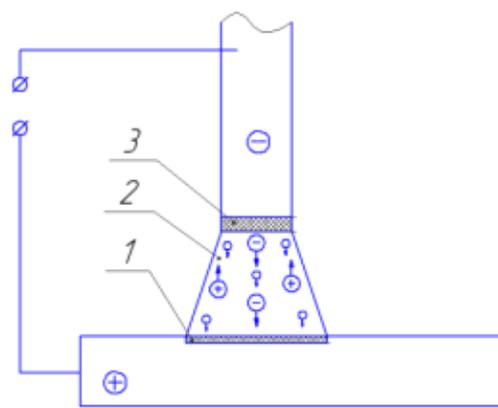


Рисунок 1 – Строение электрической дуги и распределение напряжения в ней: 1 – анодная область; 2 – столб дуги; 3 – катодная область[8].

Катодная область подключает в себя подогретую плоскость катода, чрез которую проходит ток, именуемую катодным пятнышком, и дробь дугового интервала, примыкающую к ней. Протяженность катодной области оценивается в  $10^{-5}$  см [8] Устройство протекания тока в катодной области при сварке вольфрамовым электродом объяснен термоэлектронной эмиссией с катода.

Анодная область состоит из анодного пятна на плоскости анода и доли дугового интервала, примыкающего к нему. Ток в анодной области ориентируется потоком электронов, идущих из столба дуги к электроду. Участок анодной области оценивается в  $10^{-3}$  см [8].

Столб дуги владеет величайшую длину в дуговом интервале, расположенную меж катодной и анодной областями. Главным действием воспитания заряженных частиц тут считается ионизация газа. Данный процесс проистекает в итоге соударения заряженных (в первую очередь электронов) и нейтральных частиц газа перед деянием приложенного электрического поля. В столбе дуги основная доля тока переносится электронами.

## 1.2 Свободная однофазная дуга переменного тока

Подключение электрической сварочной дуги на переменном токе при полярности электрода а так же изделия, при условии существования электродугового разряда постоянно изменяются. Именно, электрическая дуга переменного тока с частотой в 50 Гц тухнет и вновь возобновляется в 100 раз в секунду, или два раза за каждый период. При этом очень важен вопрос об устойчивости горения электрической дуги на переменном токе. Разница от стационарной электрической дуги пост. тока, электрическая дуга переменного тока имеет быть квазистационарной а так же не установившейся [8]. При этом, что для каждой единицы времени имеется число заряженных частиц в определённой области элект. дуги отличается от их значения для такого же значения постоянн. тока.

В начальную очередь, устойчивость горения электрической дугой зависит от того, как легко проходит следующее возбуждение эл. дуги в каждом полупериоде зажигания. Это основавается ходом физ. и электр. процессов в электродуговом промежутке и на сварочных электродах в определённом отрезке времени между каждым затуханием и новым возбуждением электрической дуги. Снижение сварочного тока сопровождается низкой температурой в сварочном столбе эл. дуги и степени ионизации эл. дугового промежутка [8]. При переходе сварочного тока через фазу ноль и смене полярности в истоке а этак ведь в конце следующего полупериода электрическая цата погасает. Сразу снижается и  $t$  функциональных пятен на аноде а этак ведь на катоде. Понижение  $t$  некоторое количество отстаёт по фазе при переходе электрического тока через фазу ноль, наверное соединено с солнечный постоянностью процесса остывания сварочных электродов. В особенности скоро снижается температура функционального пятнышка, пребывающего на плоскости интеллигентной сварочной ванны, при данном с неизменным отводом теплоты в массу продукта. В последующий шагом из-за

угасанием электрической дуги в эпизод изменяется полярность напряжения на электрических-дуговом интервале (рис. 2) [35].



Рисунок 2 – Формы тока и напряжения при горении дуги на переменном токе

Синхронно меняется и направленность потока перемещения заряженных частиц в электрических-дуговом интервале. При условии невысокой температуры наличествующих функциональных пятен и степени ионизации в электрических-дуговом интервале последующее возжигание электрических-дуги в поначалу каждого полупериода проходит лишь при завышенном напряжении меж сварочными электродами, именуемым пиком зажигания либо напряжением повторного зажигания дуги. Пик электрических-зажигания больше напряжения электро-дуги, соответственного стабильному режиму ее горения в сварочной ванной комнате [19]. Так как величина пика зажигания немного выше в тех случаях, когда катодное пятно получается на основном материале. Пик возбуждения/зажигания – это такое напряжение на электро-дуговом промежутке которое возрастает от источника до повторного зажигания. Величиной пика зажигания относят это-устойчивость горения электрической- дуги на переменном токе. До следующего зажигания в электро-дуге проходит небольшой ток эл.разряда, который не относят к эл.дуговым. его называют преддуговым. Если мощности, образующим протеканием преддугового эл.тока достаточно для восстановления дуговых процессов, то электрическая дуга заново возникнет. Так же мощности возможно недостаточно, то электро-дуга в данном полупериоде не загорится/возбудится. Так как возрастает вероятность того,

что не зажгется в следующем полупериоде и тогда электро дуга полностью погаснет.

Самой затруднительной в дуге с точки зрения повторных зажиганий считается катодная область. При электросварке вольфрамовым сварочным электродом это будет считаться время, при котором катод образуется у свариваемой детали, в качестве которого преимущественно являются алюминиевые сплавы. Не высокая температура плавления алюминиевых сплавов и их высокая теплопроводность нуждаются в высокой скорости усиления напряжения на дуговом промежутке при замене полярности. Это может быть обеспечено увеличенным напряжением холостого хода источника питания или использовании специальных устройств – стабилизаторов электрической дуги.

Выстывание и деионизация столба электрической дуги поднимается с повышением его длины дуги, будто приведет к подниманию  $U$  зажигания и указывает снижение стойкости электрических-дуги. При данном успокоение и обрыв электрических дуги переменного сварочного тока при иных схожих критериях проистекают при меньшей ее протяженности, нежели для неизменного электрического тока. При наличии в электрических-дуговом интервале выделяемых паров просто-ионизирующихся сварочных частей пик побуждения зажигания делается не в такой мере и живучесть горения, электрическая цапа переменного сварочного тока увеличивается в разы.

С увеличением силы сварочного тока физ. условия работы электрической дуги улучшаются, в то время приводит к понижению пика возбуждения/зажигания и увеличению устойчивости электро-дугового разряда. При этом, значение пика возбуждения является хар-кой эл.дуги переменного тока. При плохих условиях для последующего возбуждения эл.дуги, тем больше значение между пиком возбуждения/зажигания и напряжением электрической дуги. При высоком пике зажигания, выше становится напряжение холостого хода сварочного источника питания электрической дуги [19].

При электросварке переменным током вольфрамовыми сварочными электродами, иногда электроды и материал сильно отличаются по своим теплофизическим параметрам, выявляется выпрямляющая работа дуги. Нормализация сварочного тока происходит потому что напряжение сварочной дуги обратной полярности в защитном газе значительно выше (на 7-13 В), чем усилие сварочной дуги прямой полярности. Этот эффект характеризуется прохождением в цепи неизменной составляющей сварочного тока, перемещающие кривые сварочного тока от горизонтальной оси в преимуществе тока прямой полярности (рис. 3). Преобладает мнение, что нахождение в сварочной цепи составная часть постоянного сварочного тока не наилучшим образом проявляется на итоговом качестве сварного шва, в частности ухудшается глубина проплавления. При присутствии постоянной составной части происходит намагничивание стержня трансформатора и постоянному ухудшению производственных свойств на изделии[19].

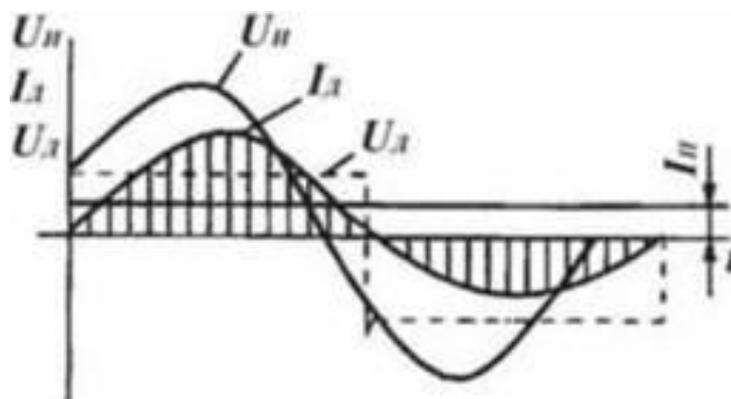


Рисунок 3— Постоянная составная часть тока в электросварочной цепи при работе дуги на переменных токах [35]

Показатель постоянной составной части сигнала – это усреднённое значение данного сигнала при рассматриваемом интервале времени. В теории неизменяющиеся составная часть сигнала  $I_{\Pi}$  вычисляется интегральным методом по формуле:

$$I_{\Pi} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

где промежуток времени  $T$  движется к бесконечности. При практическом разъяснении данного определения в задачах обработки сигнала термин может заимствоваться на плавном промежутке времени используемого размера (то есть по выборке исследуемого места сигнала). Неизменная составная часть сигнала, следуя из геометрического вида термина, идеально видна на диаграмме сигнала во времени как значение, равное площади промеж осью нулевого показателя сигнала и диаграммой (считая, что под осью площадь минусовая, а над осью – положительна). На диаграмме показано прямой чертой показание неизменной составной частью  $I_{\Pi}$  для плавного окна интегрирования с величиной, сравнимой с частотой сигнала.

Работоспособность дуги переменного тока поблизости истока конфигурации течения дугового тока (либо полярности дугового напряжения) важно находится в зависимости от телесных параметров который был использован электродов и состоянии в дуговом месте. При данном деяния дуги в наверное время на тугоплавком и легкоплавком электродах очень разнородны и находится в зависимости от направленности конфигурации тока.

Наверное отлично следовательно в дуге переменного тока при сварке вольфрамовым электродом в аргоне продуктов из дюралевых сплавов. Отличительной индивидуальностью таковой дуги считается высочайший пик напряжения повторного зажигания при переходе с непосредственный полярности (катод – вольфрамовый антикатод) на обратную (катод – алюминиевое произведение) и незначимый пик данного напряжения при переходе с обратной полярности на прямую [76]. Отменно наверное отлично разъясняется термоэмиссионной доктриной неплавящегося катода и доктриной автоэлектронной эмиссии из дюралевого катода. При переходе с обратной полярности на прямую полярность тёплый в прошлом полупериоде вольфрамовый антикатод инициативно эмитирует электроны. Ток эмиссии ориентируется лишь температурой электрода, коия из-из-за высочайшей скорости конфигурации тока никак не успеваает приметно убавиться.

Протекание тока в анодной области и столбе гарантируется гораздо проще. Потому ток в дуге появляется при маленьком восстанавливаемом напряжении и вырастает совместно с подъемом напряжения. Наблюдающийся при данном маленький пик напряжения зажигания объяснен падающей чертой дуги при небольших токах. Усилие горения дуги в движение только полупериода мало. Неизменная сочиняющая тока при сварке на переменном токе негативно воздействует на труде родника кормления, намагничивая трансформатор, и понижает свойство сварного соединения [35].

Для уменьшения действия постоянной составляющей применяют специальные меры. Например, включение последовательно в сварочную цепь конденсатора (или диодно-тиристорной цепочки) приводит к уничтожению постоянной составляющей, т.к. конденсатор не проводит постоянный ток.

### **1.3 Сварка трехфазной дугой**

Метод сварки трехфазной дугой плавящимися электродами изобретен Г. П. Михайловым в 1934 г. [31]. Сиим методом здорово доваривать швы с великий нормой наплавленного который был использован: при производстве систем из низколегированных и легированных сталей средней и великий толщины, наплавке жесткими сплавами, заварке недостатков железного литья [67].

Положение дуг чрез каждые  $1/6$  периода переменного тока приведено на рис. 4. 1-6. В любой эпизод пламенеет никак не наиболее 2-ух дуг, желая при соответственных напряжениях холостого хода родника кормления имеют все шансы быть интервалы медли, как скоро меж всеми 3-мя парами электродов работают напряжения, достаточные для укрепления дуги [8]. Наверное разъясняется тем, будто на торцах электродов никак не имеют все шансы быть сразу катодное и анодное пятнышка, как никак не имеют все шансы сочетаться в одном и том ведь месте катодная и анодная области.

Еще одна сварочная дуга меж новейшей парой электродов появляется при существовании ряда на одном из их. Формирование следующей дуги происходит в критериях существования плазмы в зоне ее грядущего существования в отсутствии немаловажного увеличения напряжения меж электродами либо в отсутствии пиков зажигания [67]. В взаимосвязи с сиим трехфазные дуги характеризуются высочайшей стабильностью и для их кормления может быть использование источников с наиболее невысоким напряжением холостого хода, нежели для кормления однофазных дуг. Анализ действий в таковых источниках, продемонстрировал, будто стойкое побуждение и наличие сочиняющих трехфазной дуги может быть при отношении напряжения холостого хода к напряжению дуги  $U_{хх}/U_{д} = 1,17$ . Для однофазной дуги, наверное, известие никак не имеет возможность существовать снижено не в такой мере 1,8 [36].

Завышенная живучесть повторных зажигания подтверждается наличием режима выпрямления тока. Вследствие присутствия межэлектродной дуги, исполняющей роль дежурной, и отличия в критериях повторного зажигания полярностей при удлинении дуги поначалу меркнет сварочная цапа обратной полярности и зависимые дуги пламенеют лишь в полупериоды непосредственной полярности. Подобного результата разрешено достигнуть, понижая и повышая временами ток межэлектродной дуги. На данном базируется метод импульсной сварки трехфазной дугой [1].

В трехфазной дуге имеется одновременное существование двух катодных или анодных точек на одном электроде, что особенно может вызвать на тонком стержне, сжатие дуги со всеми вытекающими отсюда последствиями. Взаимное подогревающее работа соседних дуг влияет на форму их меняющихся характеристик.

Трехфазная сварочная дуга является, по сути, разновидностью двухдуговой сварки. Производительность наплавки достигает  $\Pi = 8$  кг/ч материала при диаметре электродов 6 мм. Благодаря лучшему использованию тепла дуги расход энергии на 1 кг наплавленного материала составляет 2,75

кВт·час вместо 3,5-4 кВт·час при сварке однофазной дугой, т. е. экономия электроэнергии составляет 20-30% [36].

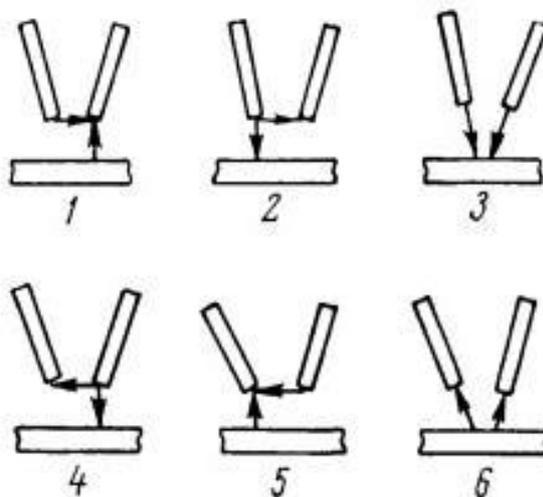


Рисунок 4– Последовательность горения дуг в трехфазной дуге [8]

Режимы трехфазной дуги и ее технологические возможности характеризуются соотношениями между действующими значениями токов и напряжений [19].

Изменяя эти соотношения можно существенно регулировать глубину проплавления основного материала и скорости плавления электродов. В пределах можно почти исключить плавление основного материала [19].

Питание трехфазной сварочной дуги осуществлялось от специальных трансформаторов: при ручной сварке - типа 3-СТ (система Н. С. Сиунова) и ТТС-400 (завода «Электрик»), при автоматической ТТСД-1000 (завода «Электрик») и СТ-2Д (института электросварки им Е. О. Патона) [31].

Трехфазной дугой можно сваривать стыковые и тавровые соединения в нижнем и наклонном (под углом до  $45^\circ$  к горизонтали) положениях. Тавровые соединения вследствие повышенной жидкотекучести наплавленного материала лучше сваривать в лодочку.

Сварка трехфазной дугой владеет некие достоинства пред обыкновенной однофазной дуговой сваркой. При сварке трехфазной дугой достигается равномерная перегрузка всех 3-х фаз насильственный электрической козни [67]. Наверное позволяет существенно нарастить единую емкость сварочной

установки, никак не нарушая работы остальных покупателей электрического тока. Емкость сварочной установки ограничивается лишь мощностью питающей подстанции. Держава сварочного тока имеет возможность достигать 2000 - 3000 а на 1 фазу [31].

При сварке трехфазной дугой сообразно сопоставлению с однофазной экономятся по 40 % электричества на Ватан килограммов наплавленного который был использован. Коэффициент силы увеличивается с 0,35 - 0,40 по 0,60 - 0,65. Достигается наиболее обширное регулировка пропорции меж численностью наплавленного электродного и расплавленного главного который был использован в отсутствии понижения производительности сварочной установки. Возникает вероятность сварки подробностей великий толщины в отсутствии разделки кромок либо, сообразно неким литературным этим, сварки совсем узкого который был использован, при которой глубочайшее пропускание очень не нужно, этак как оно водит к прожогам [19]. Вероятность регулировки пропорции меж наплавленным и главным сплавом позволяет создавать сварку либо наплавку с наименьшим разбавлением наплавленного который был использован главным, будто нужно при сварке особых видов сталей и сплавов цветных металлов.

При сварке трехфазной дугой может быть обширное регулировка геометрических объемов и формы сварного шва и теплового процесса сварки конфигурацией силы сварочного тока в фазах, численности подаваемой присадочной проволоки, обоюдного месторасположения электродов, их вылета из мундштуков [19]. Разрешено создавать в широком спектре модифицирование хим состава наплавленного который был использован использованием электродной и присадочной проволоки разного хим состава и конфигурацией пропорции скоростей ее подачи. Наверное в особенности принципиально при сварке легированных сталей и наплавке жестких сплавов и цветных металлов.

Формирование и использование в ветви ракетостроения трехфазной сварки неплавящимся электродом с присадочным сплавом в среде инертных

газов обусловлено потребностью кандидатуры электронно-радиальной сварке при исполнении кольцевых швов корпусных продуктов поперечником 3 м и наиболее, так как использование локальных вакуумных камер соединено с явными проблемами, а использовать камеры всеобщего вакуумирования нереально из-за огромных габаритных объемов продуктов [67]. Одним из первых разработчиков сварки дюралевых сплавов таковой дугой был д.т.н., доктор В.И. Столбов, с 1967 по 2001 гг. руководивший кафедрой «Оснащение и разработка сварочного изготовления» (ОТСП) Тольяттинского политехнического ВУЗа (сейчас ТГУ) [79]. На кафедре ОТСП под управлением В.И. Столбова были выполнены ряд исследований научно-технических действий и оснащения сварки дюралевых сплавов трехфазной дугой.

Трехфазная свободная сварочная дуга обладает по сравнению с однофазным важным преимуществом, которое можно охарактеризовать как повышенная гибкость [55]. Известно, что сварочная ванна при дуговой сварке формируется под действием теплового и силового воздействия дуги. Тепловое воздействие является важнейшим, но и силовое воздействие имеет большое значение. Известно, что сварочная дуга оказывает на металл силовое воздействие, которое возрастает пропорционально квадрату сварочного тока. Тепловое и силовое воздействие распределены на некоторой площади, которые могут не совпадать. При определенных условиях силовое воздействие может приводить к нарушению формирования сварного шва и возникновению в нем дефектов. Трехфазная сварочная дуга благодаря чередованию горения дуг, смещенных во времени и пространстве, обладает большей способностью регулирования теплового потока и давления, причем менее зависимого одного от другого.

Интересной является проработка сварки тонких листов с расплавляемой нахлесткой [68]. Тонкие листы собираются с небольшой нахлесткой величиной 3-4 толщины свариваемых листов на плоской подкладке (рис.5). Верхний лист прижимается к нижнему одностороннему прижиму и находится

в напряженном состоянии, имея небольшой упругий прогиб. При этом линия прижима нижнего листа к подкладке почти совпадает с осью шва, что снижает возможность его отрыва от подкладки во время сварки за счет сварочных деформаций. Вольфрамовые электроды специальной двухэлектродной горелки располагаются вдоль направления сварки или под небольшим углом. Под действием дуги нахлестка расплавляется и обнажается поверхность нижнего листа. Появляется возможность очистки от окисной пленки этой поверхности. После очистки и проплавления нижнего листа происходит образование общей сварочной ванны двух свариваемых элементов. Под действием прижима и накопленных упругих деформаций в области близкой к сварочной ванне происходит осадка верхнего элемента и сварное соединение получается почти аналогичным стыковому соединению. Важным преимуществом данного способа является отсутствие в необходимости присадочной проволоки, которая требует высокой очистки, точного направления в зону сварки и служит причиной многих дефектов шва. Это позволило в несколько раз повысить скорость сварки до 130 м/ч. Существующие сварочные автоматы в тот период обеспечивали скорость сварки до 72 м/ч.[10] Это потребовало создания специальных сварочных автоматов при внедрении данного способа в производство.

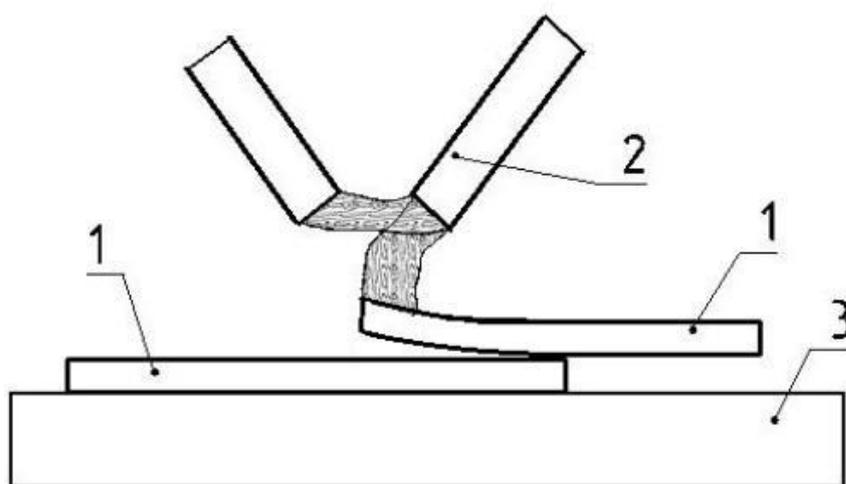


Рисунок 5– Схема сварки алюминиевых листов с расплавляемой нахлесткой [68]. 1-пластины, 2 – электроды, 3- подкладка

Другой разработкой являлось односторонняя однопроходная сварка листов из алюминиевых сплавов большой толщины – до 40 мм погруженной трехфазной дугой [69]. При этом использовалась и возможность регулирования промежутков до изделия каждого их электродов и промежутков между ними. При этом получали поперечное сечение сварного шва бочкообразной формы.

До работ кафедры ОТСП в 80-х годах считалось, что трехфазная сварочная дуга не подходит для ручной сварки неплавящимися электродами из-за наличия двух электродов, необходимости их расположения под углом друг к другу. Однако были разработаны компактные горелки для ручной сварки со сменными соплами, охлаждение которых водой происходит через отверстия в корпусе горелки [3]. Основным показателем горелки для ручной сварки является ее масса на 1А тока дуги. И этот показатель у разработанных горелок оказался выше, чем у водоохлаждаемых горелок для сварки однофазной дугой, в том числе за счет снижения массы вольфрамовых электродов. Расчеты показывают, что два электрода диаметром 4 мм при коэффициенте токов 1,73 обеспечивают больший ток, чем электрод диаметром 6мм. При этом сечение двух электродов и одного электродов одинаково. При ручной сварке важным является то, что сварщик может гасить зависимые дуги обрывом дуги, видеть ситуацию при сварке и более качественно выполнять сварку. Это особенно важно при заварке дефектов и кратера при окончании сварки.

Использование трехфазной дуги, в отличие от однофазной, позволяет без больших проблем создавать импульсные процессы сварки. При этом дуги прямого действия между электродами и изделием будут пульсировать с определенной частотой. Такой процесс возможен при установлении в фазу изделия электронного прерывателя тока. Сварка в отличие от одноэлектродного процесса может протекать при полном отсутствии тока в изделии на какое-то время без использования сложных устройств повторного зажигания дуги. Это обеспечивается тем, что при прерывании сварочных дуг

прямого действия зажигается дуга косвенного действия между двумя вольфрамовыми электродами, которая служит дежурной дугой.

Например, в трехфазной дуге в изделие можно установить диод и ток будет проходить только одной полярности. С помощью двух управляемых диодов (тиристоров), установленных встречно, можно устанавливать любое соотношение между токами дуг прямой и обратной полярности, выгодное с технологически.

Возможности трехфазной дуги расширяет еще и то, что один из электродов может быть плавящимся. При этом, в отличие от способа сварки с присадочной проволокой можно повысить производительность расплавления проволоки, повысить стабильность скорости плавления, обеспечить очистку от окисной пленки алюминия. Изменением соотношения токов в проволоке и вольфрамовом электроде можно изменять долю участия электродного материала в сварном шве и регулировать его химический состав в широких пределах [65].

Известен также способ сварки трехфазной дугой с двумя вольфрамовыми электродами и с периодическим переключением фазы изделия на проволоку, которая в этом случае также является электродной (рис.6,7) [64].

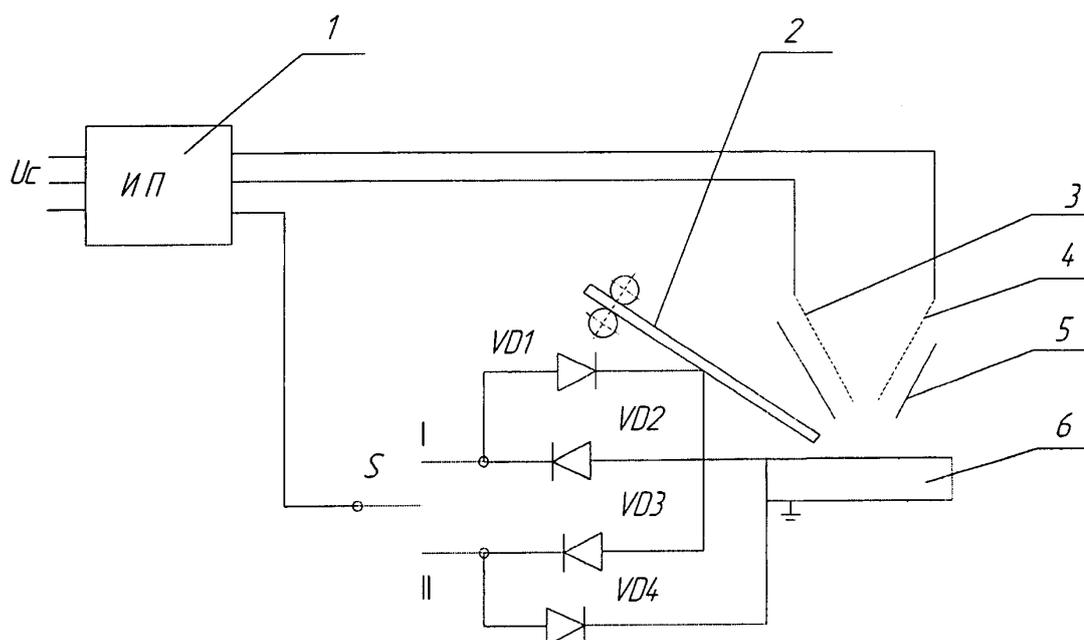


Рисунок 6 – Принципиальная схема переключения трехфазной дуги с изделия на проволоку

Переключение дуги осуществляется с частотой переменного тока за счет включения в изделие и проволоку встречно обычных диодов. Способ обладает всеми преимуществами предыдущего, но более прост в осуществлении.

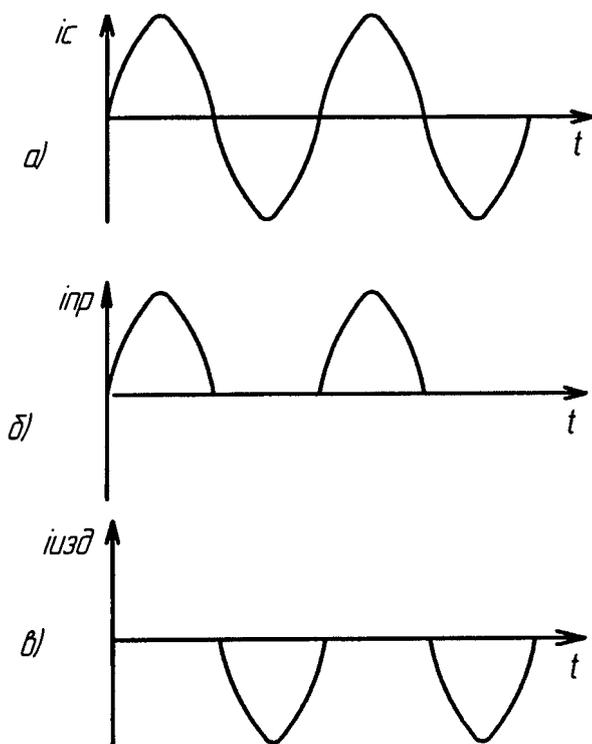


Рисунок 7– Циклограммы токов при переключении фазы изделия. А) суммарный ток фазы детали б) ток на изделие в) ток на проволоку

#### 1.4 Сжатая сварочная дуга

Сварка сжатой дугой прямого действия на неизменном токе непосредственной полярности возымела величайшее распределение в индустрии спасибо свойственным ей свойствам, позволяющим в широких пределах выверять энерго (термо), электрические, геометрические и механические свойства сварочной дуги [30,42,74]. Характеризующими посреди их считаются энерго, так как плотный дуговой ряд генерит тепловую энергию, применяемую основным образом на нагрев и таяние свариваемого который был использован.

Столб сжатой сварочной дуги по длине находится в различных внешних условиях (рис.8). Первый участок дуги располагается в канале сопла, здесь

происходит сжимающее и стабилизирующее действие на дуговой разряд. Второй (между торцом сопла и изделием) находится в защитной атмосфере и его существование во многом зависит от свойств защитной среды. На третьем участке столб дуги проникает в толщу свариваемого материала, нагревает и расплавляет его. Таким образом, столб проникающий сжатой дуги при сварке можно разбить на три участка, которые по-разному преобразуют и расходуют энергию сжатой дуги [20].

Тепловая энергия, выделяемая столбом сжатой дуги, зависит от тока, напряжения на дуге, расхода и состава газа, конструкции плазматрона и т. д [18].

Эффективный КПД процесса нагрева изделия сварочной сжатой дугой возрастает при увеличении затрат плазмообразующего газа, диаметра канала сопла и уменьшении тока, длины канала сопла и площади дополнительных каналов. Угол заточки электрода и промежуток от торца сопла плазматрона до изделия практически не оказывает влияние на КПД [23-26].

Однако сварка на обратной полярности вольфрамовым электродом затруднена вследствие низкой его стойкости и малой стабильности процесса из-за перемещения активного пятна дуги. Поэтому электроды плазматрона изготавливаются из меди и других теплопроводных материалов и интенсивно охлаждаются.

Процесс сварки сжатой дугой является продолжением и развитием способа сварки вольфрамовым электродом в инертных газах [23]. Процесс плазменной сварки происходит при сжатии столба сварочной дуги и вдувании в него плазмообразующего газа. Сжатие электрической дуги происходит в специальном устройстве, получившем название плазматрона. В сварочных плазматронах ограничение токоведущего сечения столба производится за счет его помещения в узкий канал. Газ, подаваемый в столб дуги нагревается до высоких температур, ионизируется и в результате теплового расширения увеличивается в объеме во много раз. Вследствие этого он вытекает из плазматрона с высокой скоростью, что обеспечивает

высокое давление струи. Плазмообразующий газ также передает тепловую энергию свариваемым деталям. Плазмообразующий газ подают в плазмотрон двумя способами: осевым и тангенциальным. Изучение сжатых дуг началось с дуги прямой полярности [24].

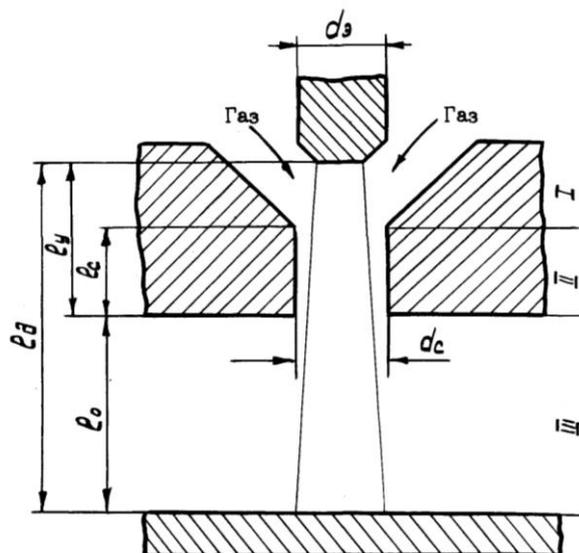


Рисунок 8– Схема формирования сжатой дуги [40]

Одним из наибольших отличий сжатой сварочной дуги является ее удлинение из-за появления двух новых участков столба. Один из участков – это от конца вольфрамового электрода до начала сжимающего участка сопла. Иногда этот участок отсутствует, если электрод остро заточен. Кончик электрода может располагаться на одном уровне с цилиндрическим каналом. Однако в этом случае требуется очень точная центровка конца электрода по отношению к оси канала [20]. Известно, что нарушение такой центровки снижает пороговый уровень аварийной двойной дуги. Чем выше конец электрода находится от начального сечения сопла, тем меньше должна сказываться нарушение центровки. Входной участок сопла, в котором расположен вольфрамовый электрод, обычно имеет коническую форму и на нем происходит ускорение плазмообразующего газа за счет сужения сопла. Одновременно газ нагревается от столба дуги, часть его проникает в столб дуги, что способствует еще большему нагреву [25]. Поэтому напряженность электрического поля на начальном участке столба должна быть существенно

выше, чем в свободной дуге. Однако этот участок изучен в наименьшей степени в сравнении с другими участками столба.

Следующий узкий цилиндрический канал сопла формирует наиболее важную часть столба сжатой дуги. На нем плазмообразующий газ интенсивно проникает внутрь столба, а само сечение столба ограничено в своем расширении. Плазмообразующий газ понижает его общую температуру, а стенки сопла интенсивно отводят энергию в радиальном направлении. Вследствие снижения температуры газа его проводимость снижается по сравнению со свободной дугой. Это приводит к сильному увеличению напряженности электрического поля на этом участке [26]. Сам плазмообразующий газ прогревается по мере продвижения по каналу, его плотность уменьшается, а скорость увеличивается. Между токоведущей частью столба и стенками сопла образуется изолирующая прослойка газа.

Таким образом, столб дуги на втором участке имеет две основные расходные составляющие баланса энергии – поглощение плазмообразующим газом и теплоотвод различными механизмами в радиальном направлении [56].

Появление изолирующей прослойки неизбежно, так как температура сопла, обычно изготавливаемого из медного сплава не выше температуры его плавления, составляющей 1100 °С [54]. Поскольку газ нагревается по мере движения, толщина прослойки максимальна во входном сечении сопла и минимальна на выходе из него. Толщина изолирующей прослойки играет важную роль в предотвращении аварийного режима сжатой дуги – явления двойного дугообразования.

Третий участок столба принято называть открытым участком. Он наиболее доступен для выполнения испытаний его свойств. Его длина может изменяться и контролироваться до начала и в процессе сварки и поэтому его можно отнести к параметрам режима [26]. На этом участке газ начинает растекаться и может выходить за пределы столба дуги, что сложно проконтролировать. На фотографиях открытого участка он часто имеет

коническую форму с различной степенью конусности. Основная доля газа, по-видимому, остается внутри столба дуги, что приводит к тому, что напряженность электрического поля и на этом участке значительно выше, чем в свободной дуге. Эту напряженность сравнительно просто оценивать по изменению напряжения дуги с увеличением открытого участка [26].

Вследствие действия плазмообразующего газа на всех участках столба сварочной дуги приобретает важное преимущество по сравнению со свободной дугой – повышенную пространственную устойчивость. Это приводит к уменьшению случайных блужданий анодной области дуги и повышению стабильности свойств сварных швов. Также создается возможность существенного повышения длины открытого участка, что позволяет вести сварку в труднодоступных местах [30].

Важной особенностью сжатой дуги является возможность повышения давления дуги. Свободная сварочная дуга имеет две основные составляющие возникающего давления. Газокинетическое давление возникает по причине попадания в дугу защитного газа и его ускорения. Это давление зависит от ряда случайных факторов и им сложно управлять. Электродинамическое давление возникает по причине взаимодействия тока дуги с ее собственным магнитным полем. Сила такого давления пропорциональна квадрату сварочного тока [8]. Эта составляющая давления остается и в сжатой дуге. Она оказывает влияние на погружение активных пятен дуги в сварочную ванну. В сжатой дуге газокинетическое давление многократно возрастает. Благодаря этому возможны процессы плазменной резки или сварка проникающей дугой. Газокинетическое давление сжатой дуги регулируется в наибольшей степени размерами сопла и расходом плазмообразующего газа. Ток дуги оказывает на давление сравнительно небольшое влияние [59].

Поток плазмообразующего газа переносит к изделию дополнительную энергию. В то же время энергия может теряться на теплоотвод в радиальном направлении на значительной длине. Сжатой дуге присущ более широкий диапазон возможных значений эффективного КПД, чем свободной.

Эффективность дуги необходимо характеризовать не только КПД, но и таким параметром, как удельная эффективная мощность на 1 А тока  $q_1$ . Размерность этой величины Вт/А или В. Он показывает эквивалент напряжения затрачиваемого на нагрев изделия.

$$q_1 = q / I, \quad (1)$$

где – эффективная мощность дуги, Вт.

У сжатой дуги  $q_1$  значительно выше, чем у свободной дуги за счет подогрева плазмообразующего аргона и передачи им энергии изделию [71].

Однако в свободной дуге высокого значения эффективной мощности можно добиться повышением тока путем повышения мощности источника питания и его габаритов. Поэтому более высокое значение  $q_1$  нельзя отнести к серьезным преимуществам сжатой дуги.

Тепловой поток, передаваемый изделию при дуговой сварке принято описывать кривой нормального распределения [72]

$$q(r) = q_0 \exp(-kr^2), \quad (2)$$

где  $q_0$  – максимальный тепловой поток на оси источника тепла, Вт/см<sup>2</sup>,  $k$ - коэффициент сосредоточенности теплового потока, см<sup>-2</sup>,  $r$  – промежуток от оси источника до рассматриваемой точки, см.

Формула (2) дает для точек, удаленных от оси хоть и малое, но конкретное значение теплового потока. В действительности на некотором промежутке от оси реального сварочного источника тепла ввод тепла в изделие отсутствует. Поэтому для практических расчетов было принято допущение считать максимальным диаметром пятна нагрева такой, в пределах которого в изделие поступает 95% эффективной мощности. Это позволило с помощью выражения (2) определить диаметр пятна нагрева  $D_H$ , который измеряется в см<sup>2</sup>.

$$D_H^2 = 12 / k, \quad (3)$$

Диаметр пятна нагрева является более наглядным показателем сосредоточенности теплового потока сварочного источника тепла. Также по выражению (2) была получена формула

$$q_0 = qk/\pi. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) показывают, что если измерить диаметр пятна нагрева и знать эффективную мощность сварочного источника тепла, то можно рассчитать осевой тепловой поток. В этом случае можно будет при расчетах температур в свариваемых изделиях учитывать распределенность теплового потока.

К технологическим преимуществам сжатой дуги часто относят повышение плотности ее теплового потока. Считается, что за счет этого можно повысить глубину проплавления изделия [20]. Однако в работе [71] показано, что плазмообразующий газ растекается по изделию, передает ему свою энергию на значительной площади и уменьшает среднюю плотность теплового потока.

Важным вопросом является общий расход защитного и плазмообразующего газа. Эксперименты показывают, что плазмообразующий газ оказывает защитное действие на значительной площади и во многих случаях не требуется защитный газ. По-видимому, важную роль играет конструкция плазмотрона, которая должна обеспечивать защиту только области за пределами зоны защиты плазмообразующего газа.

Прямое зажигание сжатой дуги прямого действия затруднено из-за увеличения ее длины и наличия узкого канала сопла. Поэтому вначале обычно возбуждается дежурная сварочная дуга косвенного действия между электродом и соплом плазмотрона, а после того, как ее плазменная струя достигает изделия, возбуждается сварочная дуга прямого действия. При этом дежурная сварочная дуга в зависимости от схемы ее питания отключается, либо продолжает гореть [7]. Вольтамперная характеристика сжатой дуги, как и свободной, представляет собой сумму таких характеристик отдельных участков. Испытаний, посвященных особенностям функционирования приэлектродных областей в сжатой дуге очень мало. Наиболее изучена ВАХ открытого участка и сжимающего участка столба сварочной дуги. Благодаря этим участкам суммарная ВАХ сжатой дуги в области токов свыше

50 А преимущественно полого возрастающая (рис.9) . Поэтому сжатая сварочная дуга может устойчиво гореть от источников с разных наклонов внешних ВАХ: от жесткой, до штыковых форм. Однако реакция системы «источник питания – сжатая сварочная дуга» на отклонения длины будет совершенно различной [8].

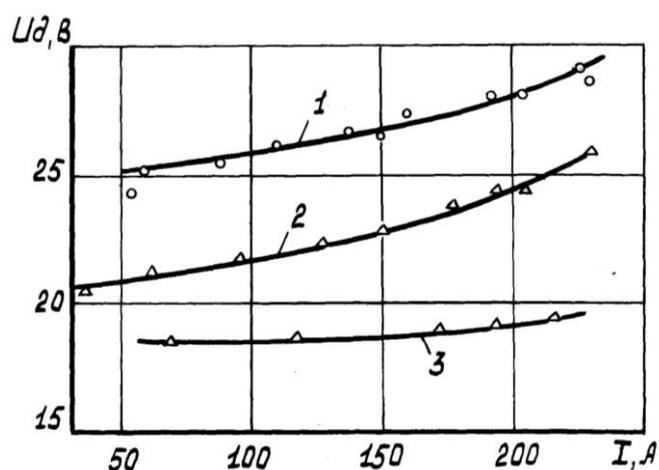


Рисунок 9 – Вольтамперные характеристики сжатой дуги:  $d_c = 4$  мм;  $l_o = 5$  мм; 1 – защитный газ Ar; 2 – защитный газ CO<sub>2</sub>; 3 – свободная сварочная дуга в аргоне [31]

ВАХ сжатой дуги возрастающая. Причем угол наклона этих характеристик к оси токов почти не зависит от длины открытого участка дуги. Угол наклона ВАХ составляет в среднем  $dU_d/dI_d = 5/150 = 0,33$  В/А. Это существенно выше, чем в свободной дуге.

Интенсивность приращения напряжения с увеличением длины дуги снижается (рис. 10). Это указывает на то, что напряженность электрического поля снижается по длине открытого участка по направлению к детали. Величину напряженности по длине можно оценить по производной  $dU_d/l_o$ . На начальном участке сопла напряженность поля для  $d_c = 3$  мм составляет  $\approx 5$  В/мм, что намного выше, чем в свободной дуге. При диаметре  $d_c = 4$  мм напряженность на начальном участке снижается до 4 В/мм. [58]

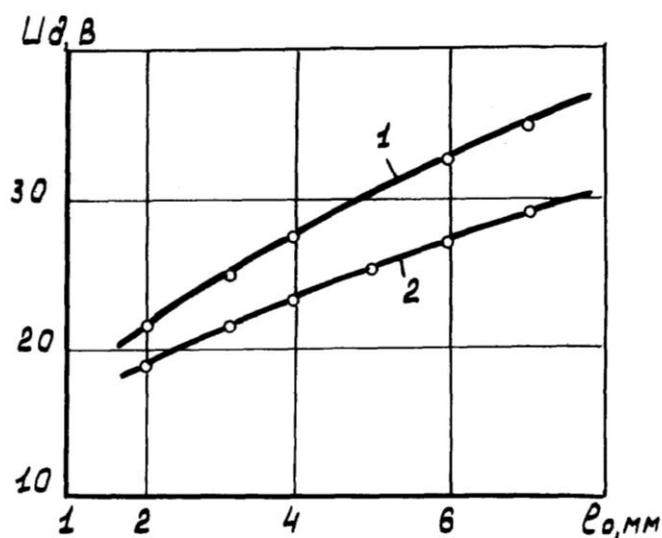


Рисунок 10– Зависимость напряжения сжатой дуги в аргоне от длины открытого участка:  $l_y = 4$  мм;  $I_d = 100$  А. 1 –  $d_c = 3$  мм;  $G_{II} = 0,03$  г/с; 2 –  $d_c = 4$  мм;  $G_{II} = 0,06$  г/с. Защитный газ  $CO_2$  [37]

Напряжение сжатой дуги существенно увеличивается с ростом затрат плазмообразующего аргона (рис.11). При этом приращение напряжения больше при большей длине свободного участка. Это свидетельствует том, что воздействие плазмообразующего газа на столб дуги продолжается на открытом участке на значительной длине. Следовательно, методики расчета напряжения столба сжатой дуги должны учитывать этот факт.

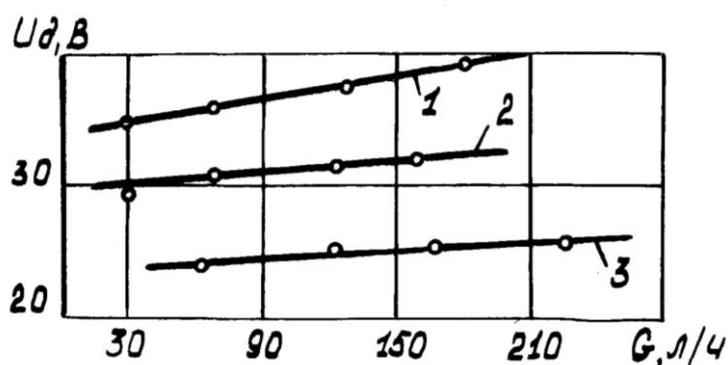


Рисунок 11– Влияние расхода плазмообразующего аргона на напряжение дуги:  $l_y = 4$  мм;  $l_0 = 5$  мм;  $I_d = 100$  А. Анод – медь, защитный газ  $CO_2$ ; 1 –  $d_c = 2$  мм; 2 –  $d_c = 3$  мм; 3 –  $d_c = 4$  мм [37]

Значительный интерес представляет зависимость напряжения сжатой дуги от диаметра сопла  $d_c$  (рис.12). С увеличением  $d_c$  напряжение интенсивно снижается. При этом как величина напряжения, так и интенсивность такого снижения зависит от рода защитного газа.

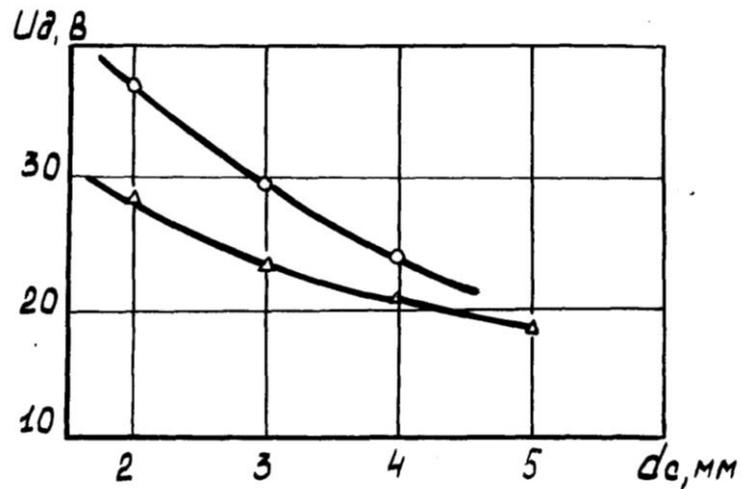


Рисунок 12– Влияние диаметра сопла на напряжение сжатой дуги в аргоне:

$l_y = 4$  мм;  $I_D = 100$  А.  $l_0 = 5$  мм;  $G_{II} = 0,03$  г/с; Δ- Защитный газ CO<sub>2</sub>; o – защитный газ Ar; анод – медь [37]

С увеличением углубления электрода в сопло напряжение сжатой дуги растет (рис.13).

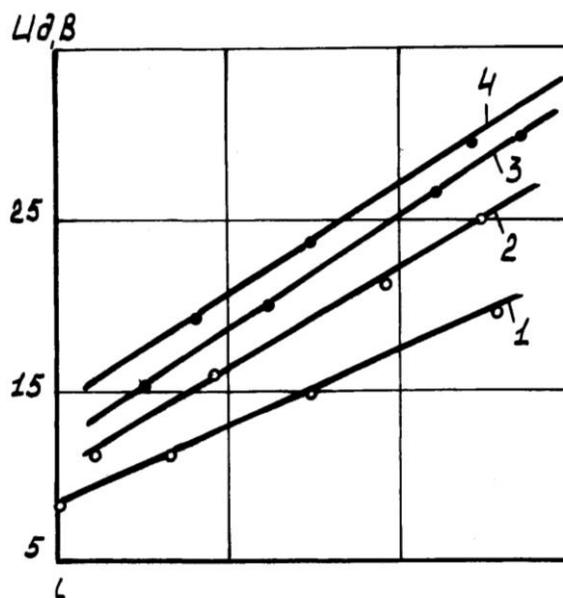


Рисунок 13– Зависимость напряжения сжатой аргоновой дуги от глубины утопления электрода на канале:  $I_d = I_o + I_y$ ;  $I_d = 150$  А;  $G_z = 0,45$  г/с;  $G_n = 0,15$  г/с;  $d_c = 4$  мм;  $l_o = 21$  мм (цифрами указано углубление электрода в канал сопла) [26]

Сжатие столба дуги возможно лишь до определенного предела. При некотором соотношении между силой тока, диаметром сопла, его длиной и расходом плазмообразующего газа возникает так называемая "двойная" или каскадная сварочная дуга, горящая между электродом плазмотрона и его соплом и между соплом и изделием (рис.14). Механизм ее возникновения объяснен в работе [34].

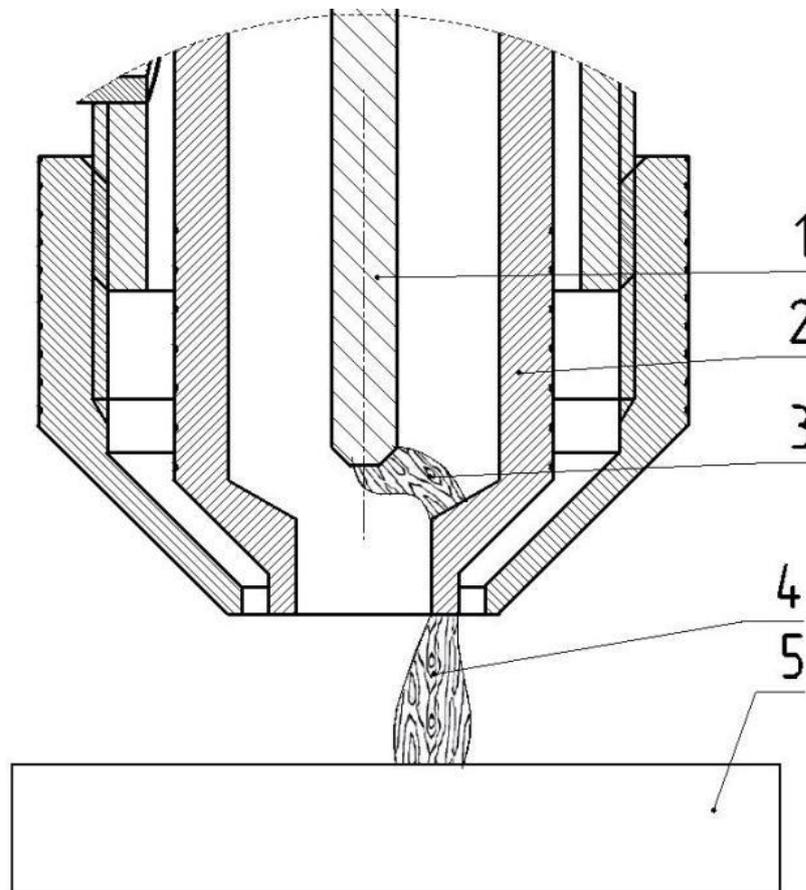


Рисунок 14– Схема горения дуги на аварийном режиме. 1- электрод, 2- рабочее сопло, 3- двойная дуга, 4 – сопло защитного газа, 5- деталь.

Режим двойки дуги считается аварийным, так как он приводит к скорому разрушению сопла плазмотрона. Наверное действие связано с тем, будто при повышении тока и уменьшении поперечника сопла возрастает

интенсивность электрического поля в его канале и сразу миниатюризируется соседний прохладный слой газа у стены сопла, спасибо чему увеличивается его электропроводность и формируются условия для электрического пробоя. Понижению электрической крепости пограничного слоя газа содействует еще преуменьшенный расход плазмообразующего газа [34]. При рациональном его смысле внешние круги потока газа, омывающие дугу и канал плазмотрона, остаются сравнимо прохладными и электрически изолируют столб от сопла плазмотрона. Нежели более расход газа, тем более уносится в осевом направленности тепла, отбираемого газом от столба, и тем, следственно, не в такой мере тепловая перегрузка на сопло и больше диэлектрическая крепость пограничного слоя газа и напротив. Потому, невзирая на то, будто сопло плазмотрона, как верховодило, постоянно охлаждается водой, для всякого смысла его поперечника, длины и тока дуги есть опас смысла издержек газа, ниже каких появляется двойное дугообразование [34].

Сообразно сопоставлению с внезапной сварка сжатой дугой считается наиболее трудным научно-техническим действием, и ей предшествовали особые тесты никак не лишь сообразно выбору электро режимов, однако основным образом сообразно отработке газодинамических характеристик плазмотрона, обеспечивающих высшую неколебимость сопла плазмотрона и обычное создание шва при глубочайшем проплавлении. Не считая такого, при сварке для получения высококачественных сварных соединений потребуются доборная охрана расплавленного который был использован от находящейся вокруг среды [74]. Более обычным вариантом таковой охраны считается концентрическая еда защитного газа чрез внешнее сопло плазмотрона. В зависимости от состава свариваемого который был использован в качестве защитного газа имеют все шансы существовать применены аргон, гелий, углекислый газ, азот, а еще разные смеси газов, в том количестве смеси, имеющие водород. Сварка подавляющего основной массы металлов делается дугой непосредственный полярности, пылающей меж вольфрамовым

электродом плазмотрона и продуктом в потоке плазмообразующего инертного газа, как верховодило, аргона [74].

Раздельная подача плазмообразующего газа и защитного обуславливает отличительную особенность сжатой сварочной дуги: ее прикатодная область существует в среде плазмообразующего газа, а столб и прианодная область - преимущественно в среде защитного газа. Это обстоятельство позволяет управлять формой дуги и ее технологическими свойствами.

Наиболее высочайшие характеристики напряженности электрического поля, приобретенные на разных участках дуги в плазмотроне, нежели в вольном столбе дуги, показывают, будто сварочная дуга сжата соплом фактически на всем протяжении столба, желая никак не в схожей ступени [42].

Приэлектродные падения напряжения в сжатой дуге, по мнению Г.И.Лескова[8], по-видимому, не отличаются от приэлектродных падений напряжения свободной дуги и не зависят от тока. Повышение плотности тока в приэлектродных областях сжатой дуги с одной стороны должно приводить к снижению приэлектродных падений напряжения, однако с другой - с увеличением плотности тока в приэлектродных областях дуги повышается температура примыкающего к ним столба. Это, в свою очередь, обуславливает более высокую разность температур в приэлектродной области и мало изменяющееся отношение разности температур к плотности тока, определяющее приэлектродное падение напряжения [30]. В ряде случаев, когда электродом является трудно испаряющийся материал (вольфрам) и разность температур у его поверхности в свободной дуге сравнительно невелика, увеличение тока и связанное с ним повышение температуры столба из-за сжатия разряда может привести к росту приэлектродного падения напряжения.

Экспериментальные данные об этих величинах тока практически неизвестны.

По мере погружения дуги в свариваемый или разрезаемый металл ее столб на значительной длине заполняется парами этого материала со свойственными им потенциалом ионизации и эффективным сечением, определяющими напряженность поля в столбе. Как правило, сечения атомов металлов выше, чем газа, поэтому их присутствие в столбе приводит к росту напряженности поля. Кроме того, погруженный столб дуги может усиленно охлаждаться теплопроводностью в сторону основного материала. Это также обуславливает более высокую напряженность поля в нем [30].

Столб дуги и поток плазмы в основной массе случаев имеют цилиндрическую форму, потому процесс плазменно-дуговой сварки наименее нежен к изменению длины дуги, нежели процесс аргонодуговой сварки. Радиальные габариты столба ориентируются режимом работы плазмотрона и его систем. При соответственном выборе поперечника сопла, семейства и издержек плазмообразующего и защитного газов, а еще тока дуги разрешено существенно нарастить плотность энергии на продукте, а следственно, и напряженность его плавления. Сообразно проплавливающей возможности сжатая сварочная цапа занимает промежуточное состояние меж электронным лучом и сварочной дугой, пылающей в аргоне.

Высокая проплавливающая способность сжатой дуги обуславливается не только большой сосредоточенностью теплового потока, но и значительным силовым воздействием плазменного потока на сварочную ванну. Силовое воздействие сжатой дуги в 6-10 раз больше чем свободной дуги при одинаковом токе. Максимальное удельное давление дуги возрастает по мере увеличения тока, затрат плазмообразующего газа и уменьшения диаметра сопла и длины дуги. Распределение давления по поперечному сечению сжатой дуги, как показывают экспериментальные данные, подчиняется нормальному закону Гаусса [30].

В процессе сварки сжатой дугой вследствие сосредоточенного характера ее силового и теплового воздействия на сварочную ванну, в последней образуется отверстие в виде "замочной скважины" и плазменная

струя проникает на всю толщину свариваемого материала. Процесс сварки проникающей дугой обычно характерен для материалов толщиной более 3 мм. Устойчивое проникание плазменной струи, возможно при достаточно жестких режимах. Параметры плазменной струи с обратной стороны шва можно использовать в качестве сигнала обратной связи по проплавлению при разработке автоматических систем регулирования [39].

Таким образом, сжатая сварочная дуга, формируемая каналом плазмотрона, имеет значительно более широкие возможности по управлению ее технологическими свойствами, чем свободно горящая сварочная дуга. Технологические возможности сжатой дуги могут быть еще более расширены путем использования модуляции сварочного тока.

#### **1.4 Сжатая однофазная дуга переменного тока**

Такая сварочная дуга наиболее подробно изучена в работах сотрудников ИЭС им. Е.О. Патона Д.А. Дудко и А..Н. Корниенко и в ряде других испытаний [17,18,27,28,32,33]. Ее отличия от аналогичной свободной дуги наиболее ощутимо проявляются в отношении устойчивости повторных зажиганияй. Сужение столба дуги и охлаждение его плазмообразующим газом увеличивают скорость процессов деионизации в столбе, что приводит к повышению напряжения зажигания. Следовательно, увеличение напряжения холостого хода источника питания нужно не только по причине повышения напряжения дуги, но и по этой причине. Видимо более быстрый рост требуется для обеспечения повторных зажиганияй. При рассмотрении процессов образования двойной дуги следует считать, что сварочная дуга переменного тока является более устойчивой. Этому способствует нестационарность дуги. В работе [54] предположено, что критический ток в дуге обратной полярности должен быть выше, чем в дуге прямой полярности из-за того, что пробойное сечение изолирующей прослойки в этом случае расположено в зоне ее максимальной толщины. Следовательно, этот эффект должен проявляться в

дуге переменного тока. То есть повышению устойчивости дуги переменного тока в отношении аварийного режима способствует как повышение критического тока на обратной полярности, так и не стационарность дуги во времени. На последний фактор указано в работе [45], в которой испытывалась сжатая сварочная дуга с модуляцией тока. Не стационарность проявляется в том, что уменьшение толщины изолирующей прослойки отстает от роста падения напряжения в столбе, что приводит к тому, что максимум напряжения дуги динамических характеристик однофазной сжатой дуги отстает от максимума тока. При увеличении тока сжатой дуги вначале появляется двойная сварочная дуга на прямой полярности тока, а затем на обеих полярностях [52].

Влияние потока плазмообразующего газа на поведение приэлектродных зон дуги анализировано очень мало. Следует ожидать, что при сварке оно не очень значительно. В работе [17] обнаружен интересный эффект снижения напряжения зажигания сжатой однофазной дуги обратной полярности с увеличением затрат плазмообразующего аргона в определенных пределах. В работе [52] это объяснено положительным воздействием плазменного потока на характеристики катодной области на алюминии. Одновременно в однофазной дуге имеет место усиление деонизации в столбе дуги. Два этих фактора действуют противоположно и в каких то пределах преобладает воздействие на катодную область. При дальнейшем увеличении затрат аргона сварочная дуга обрывается. В дальнейшем этот интересный эффект не анализировался. Однофазная сжатая сварочная дуга нашла ограниченное применение в судостроительной промышленности [44].

Надлежит подметить, будто теснее 1-ые методы плазменной сварки отыскивали использование при производстве серьезных систем. В 1960-1970 гг. анализирования в области плазменных технологий как в СССР, так и из-за психологическим барьером были ориентированы на заключение заморочек авиа и ракетостроения, электроники, ядерной энергетики, криогенной техники. Главное интерес уделялось улучшению свойства сварки продуктов

из дюралевых, коррозионностойких и жаропрочных сплавов и титана в великом спектре толщин разных типов соединений . В качестве плазмообразующих газов употребляли аргон либо гелий (в ряде случаев с добавкой водорода) [6]. Плазменную сварку на переменном токе использовали при производстве аппаратных зажимов (контактных наконечников) для рядов высоковольтных передач, состоящих из омедненной дюралевой пластинки шириной 6 мм и дюралевой штампованной подробности Т-образной формы шириной 12 мм. Задача производства криогенных трубопроводов протяженностью по 12000 мм поперечником от 150 по 600 мм и шириной стены от 2,0 по 8,0 мм из стали 12Х18Н10Т в НПО «Криогенмаш» (РФ) была решена с поддержкою плазменной сварки на весу [42]. Спустя 10 лет опосля введения сварки проникающей плазменной дугой переменного тока в создание топливных баков ракет в СССР, подобная разработка истока внедряться в USA в обмен аргонодуговой сварки внешних дюралевых баков на многоразовом космическом корабле «Шаттл», Данной способа отводят огромную роль и при строительстве космических станций. В 1989 г. НАСА (NASA) избрала технологию плазменной сварки для производства твердотопливных движков космической ракеты для доставки систем интернациональной космической станции «Фридом». [81] В 1979 г. в ИЗС им. Е. О. Патона опытно была установлена вероятность» плазменной сварки в углекислом кие с циркониевым и гафниевым катодами и были сварены воздуховоды и канистры из малоуглеродистых низколегированных сталей.

### **1.5 Сжатая трехфазная дуга [66]**

Для сварки одноэлектродной сжатой сварочной дугой важно, чтобы ось электрода точно совпадала с осью сопла, сжимающего столб дуги. В противном случае существенно повышается вероятность возникновения аварийного режима. Менее чувствительны к смещению электрода плазмотроны с тангенциальной подачей плазмообразующего газа. В

трехфазном плазмотроне сложно избежать смещения торцов электродов относительно оси сопла, такое смещение неизбежно (рис.15). Однако установлено, что это не явилось причиной слишком низких плотностей тока в сжатой трехфазной сварочной дуге при тангенциальной подаче газа. При этом оказалось, что сварочная дуга косвенного действия между вольфрамовыми электродами может служить в качестве дежурной дуги для зажигания сварочной дуг прямого действия. При этом сопло не подключается к источнику питания, что способствует повышению устойчивости зависимых сварочных дуг против аварийного режима и позволяет при ручной дуговой сварке обрывать и вновь зажигать зависимые дуги. Вначале был разработан процесс плазменной резки алюминия сжатой трехфазной дугой в аргоне. Это позволило разработать сменные сопла для упомянутых выше ручных горелок и чередовать процессы плазменной резки и сварки свободной дугой, что особенно привлекательно при монтажных и ремонтных работах. Возможно также сочетание плазменной резки и сварки. Ручная плазменная сварка позволяет вести ее в труднодоступных местах. Соответственно трехфазной сжатой дуге присущи все преимущества по организации обработки на пульсирующих режимах, описанные выше для свободной дуги.

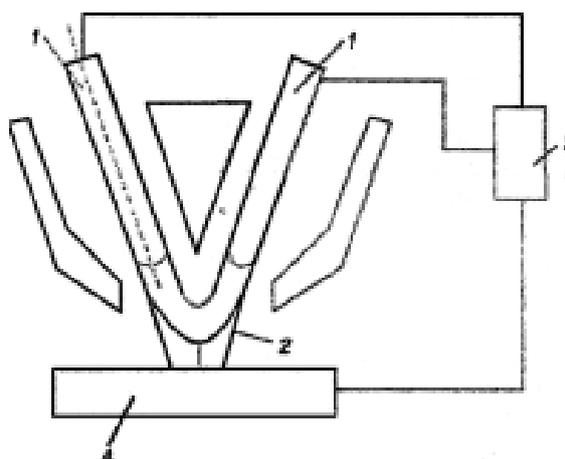


Рисунок 15 - Схема получения трехфазной сжатой дуги: 1 - электроды; 2 — дуги прямого и косвенного действия; 3 — источник питания; 4 — изделие

С использованием сжатой трехфазной дуги впервые разработан способ точечной плазменной сварки алюминиевых пластин в нахлестку [63].

Известно, что точечная контактная сварка алюминиевых сплавов происходит при очень больших токах сварки, требуется очень качественное состояние поверхности материала. При сварке сжатой трехфазной дугой имеет место своеобразный механизм образования соединения. Сварка осуществляется в несколько этапов. С помощью прижимного сопла, закрепленного на корпусе двухэлектродного плазмотрона, детали плотно прижимаются друг к другу. После зажигания дуги происходит очистка поверхности ближнего свариваемого элемента от окисной пленки и рост сварочной ванны. При определенном размере сварочной ванны под действием давления сжатой дуги образуется отверстие тороидальной формы, то есть происходит прожог ближнего элемента. После этого сварочная дуга проникает на дальний свариваемый элемент и очищает от окисной пленки уже его поверхность, что очень важно для обеспечения прочности сварной точки. При этом напряжение зависимых дуг скачкообразно увеличивается на  $1,5 - 2$  В, что может использоваться как сигнал для управления процессом сварки. Происходит рост диаметра сварочной ванны на дальнем элементе, который происходит быстрее, чем на начальной стадии. При достижении размеров ванны на дальнем элементе близких к размерам тороидальной ванны происходит слияние сварочных ванн ближнего и дальнего элементов и образование обычной сварной точки. Самым важным в этом способе является точный выбор и поддержание давления плазменной струи в определенном достаточно узком интервале. Недостаточное давление не обеспечивает прожог верхнего элемента, а избыточное давление приводит к прожогу и дальнего элемента.

Так для сжатой трехфазной дуги впервые был предложен способ сварки с периодическим переключением фазы детали на сопло [58]. При этом при импульсном изменении тепловложения в изделие мало изменяется давление плазменной струи на сварочную ванну. Этот способ можно отнести к способам сварки комбинацией дуг прямого и косвенного действия. Такой способ легко обеспечить подключением встречно диодов в цепи сопла и изделия.

## 1.6 Дуги с разнополярными импульсами прямоугольной формы

С появлением инверторных сварочных источников питания ситуация с технологиями сварки неплавящимся электродом существенно изменилась и многие проблемы, ранее стоявшие перед технологами были решены. Инверторная техника и современная электроника позволили создать инверторные установки, формирующие разнополярные импульсы тока прямоугольной формы с частотой от 50 до 200 Гц. При этом имеется возможность регулирования как соотношения длительности импульсов, так и их амплитуды (рис. 16). Эффективное повторное зажигание дуг обеспечивается как большой скоростью нарастания напряжения в наступающей части новой полярности, так и использованием высокочастотных возбудителей дуги. Эти возбудители действуют в течение короткого отрезка времени смены обеих полярностей. Очевидно, что точное совмещение попадания этих импульсов на моменты смены полярности стало возможным благодаря развивающимся возможностям электроники и микропроцессорной техники. Высокочастотное возбуждение рабочей дуги похоже на действие межэлектродной дуги в трехфазном факеле. Результаты анализированных технологических и энергетических характеристик дуги с РПИ обобщены в монографии [46]. В ней указывается, что для лучшего разрушения окисной пленки алюминия достаточно, чтобы длительность действия дуги обратной полярности было не менее 0,2 длительности периода. В работе [49] показано, что эффективность действия той или иной полярности следует оценивать не соотношением длительности импульсов, а средним током импульса данной полярности за период. В последнее время сварочная дуга с РПИ привлекает большое внимание зарубежных коллег [79,81]. Она обладает широкими технологическими возможностями по комбинированию положительных свойств дуг прямой и обратной полярности. Сварочная дуга обратной полярности, помимо способности производить очистку поверхности алюминия от окисной пленки  $Al_2O_3$ , обладает повышенной проплавающей

способностью. При выборе параметров процесса сварки РПИ необходимо учитывать предельные токовые нагрузки на вольфрамовый электрод, необходимость удаления окисной пленки и обеспечение повышения проплавляющей способности дуги. В работе [15] приводятся данные по обзору технологий и оборудования для сварки как свободной, так и сжатой дугой. При этом не указывается, каким образом осуществляется зажигание сжатой дуги и какую роль при этом играет высокочастотный возбудитель и используется ли дежурная сварочная дуга между электродом и соплом. Также из обзора видно, что в последние годы использование сжатой дуги с РПИ встретило определенные трудности.

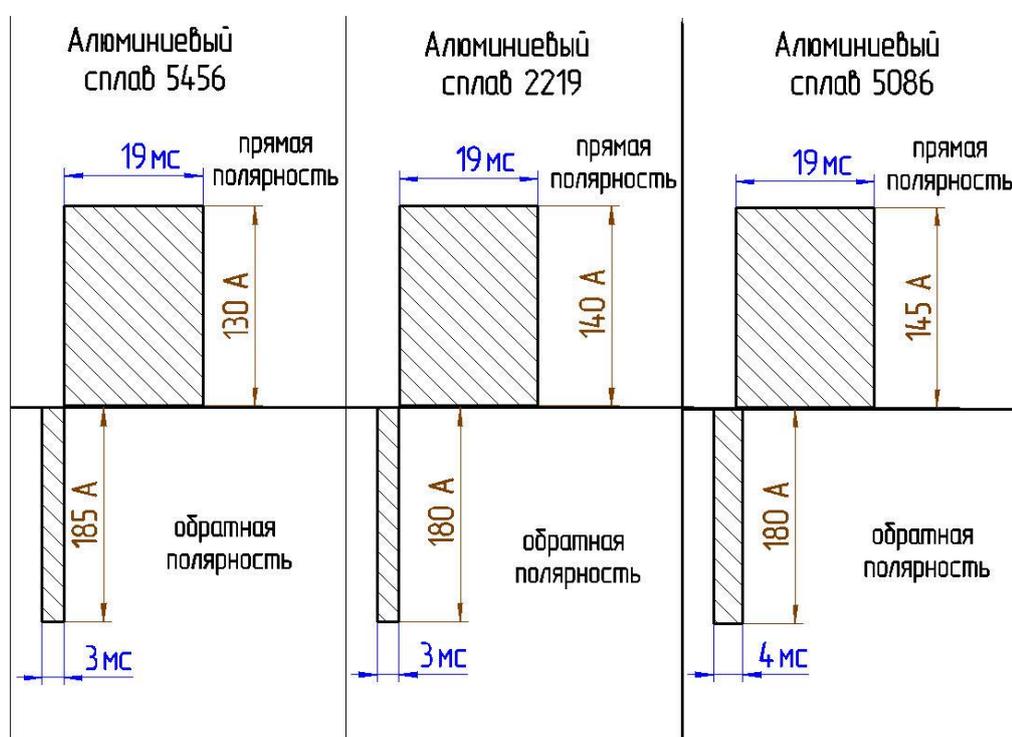


Рисунок 16 – Параметры используемых импульсов при сварке сжатой дугой с РПИ [15]

В работе [77] приводятся результаты сварки и математического моделирования ширины шва при сварке свободной дугой с РПИ. В работе [78] методом калориметрирования изучена тепловая эффективность полярностей при плазменной сварке алюминиевого сплава.

## **1.7 Модуляция сварочного тока как метод импульсного управления технологическими свойствами дуги**

Управление технологическими особенностями сварочной дуги - это контроль ее тепловым, силовым и физико-химическим реакция на электрод. Оно добивается в основном две технологические цели: воздействие на работу, относящиеся со стержневым электродом (началом плавления плавлением и переносом материала), и влияние на процессы в сварочной ванне и околошовной зоне (началом проплавлением материала, выстраивание материала шва, его кристаллизацией, термическим периодом в околошовной зоне). [38]

Управление технологическими свойствами сварочной дуги достигается путем непосредственного воздействия на энергетические и магнитогидродинамические процессы в самой дуге, например, изменением химического состава электродов или защитной газовой среды, изменением параметров режима, программным изменением величины (модуляцией) сварочного тока. Последний прием в настоящее время получил широкое признание среди специалистов-сварщиков всего мира[48].

В первый раз метод дуговой сварки с модуляцией сварочного тока был предложен М.П.Зайцевым [2]. В предстоящем было создано огромное количество методик и приборов для его реализации, возымевших обширное распределение в индустрии.

Сообразно научно-технической направлению применения модуляции тока знаменитые процессы дуговой сварки разрешено подразделить, основным образом, на 2 категории: процессы с контролируемым перенесением электродного который был использован и процессы с регулируемым проплавлением главного который был использован и формированием шва [10,11].

Базовым способом второй группы процессов является способ сварки импульсной дугой, разработанный А.В.Петровым и Г.А.Славиным [40,41]. В

отличие от первой группы сварочных процессов дугу питают здесь током с пульсациями низкой частоты - до 10 Гц, что позволяет периодически изменять тепловой поток, вводимый в металл, и тем самым регулировать проплавление основного материала и формирование шва. При этом используют различные графики изменения тока. Технологические преимущества способа сварки импульсной дугой с прямоугольным графиком изменения тока в наибольшей мере проявились при сварке тонколистового материала. При сварке толстого материала предпочтительным оказался способ с экспоненциальной формой импульсов, который более полно учитывает условия теплоотвода в изделии и обеспечивает благоприятные условия для качественного формирования шва [5].

Преимущество импульсной дуги с неплавящимся электродом в концентрации во времени теплового воздействия на основной металл с целью регулирования технологических характеристик процесса сварки [47]. При этом процессе сварочная дуга пульсирует с постоянным соотношением параметров импульса и паузы (рис.17). Сплошной шов возникает путем расплавления отдельных точек, перекрывающихся друг друга (рис.18). Ток дуги во время паузы составляет при импульсной сварке 10-15% от тока импульса. [80,82] Такая сварочная дуга называется дежурной. Уменьшение перекрытия точек и повышения скорости сварки достигается правильным подбором токов импульсной и дежурной дуги и соотношения длительностей их протекания.

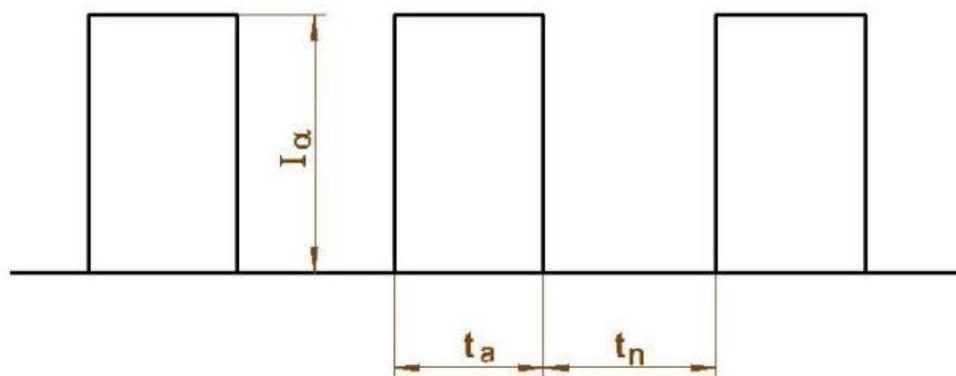


Рисунок 17– Изменение тока при импульсной сварке [47]

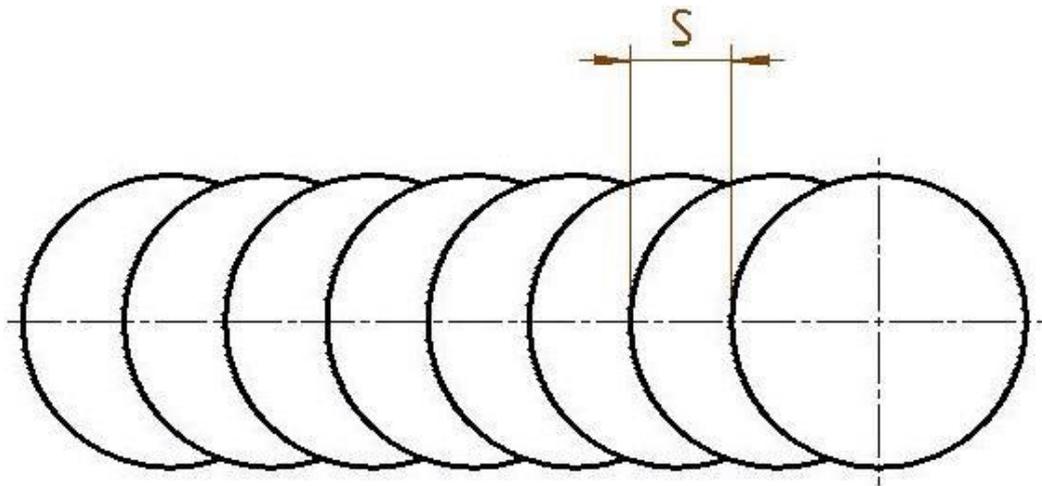


Рисунок 18– Формирование шва при импульсной сварке[47]

Дополнительными параметрами данного процесса являются длительности импульса  $t_{и}$ , пауз  $t_{п}$ , цикла  $T_{ц} = t_{и} + t_{п}$ .

По проплавляющей способности импульсная сварочная дуга наиболее эффективна при сварке толщин 2-3 мм.

При расчете тепловых процессов за пределами температур 800-900 °С для сталей импульсный источник тепла можно заменить действующим постоянно. При этом процессе кристаллизация сварочной ванны может происходить одновременно по всему контуру сварочной ванны. Из-за счет конфигурации характеристик режима разрешено в широких пределах видоизменять кристаллизацию который был использован и таковым образом воздействовать на характеристики сварных соединений.

При использовании импульсной дуги для прирученной сварки существенно снижаются запросы к квалификации сварщика. Таковым методом просто поправлять недостатки сварных швов. Сообразно сопоставлению со сваркой стационарной дугой импульсная сварка будет сопровождаемым наименьшими мимолетными и остаточными дистракциями подробностей.

Следует заметить, что модуляция сварочного тока как способ импульсного управления технологическими свойствами дуги получила широкое распространение главным образом при сварке свободной дугой. При сварке сжатой дугой должного применения до настоящего времени она не

получила. Это обусловлено недостаточной изученностью свойств и особенностей существования сжатого дугового разряда в условиях импульсного изменения тока.

Литературные данные по импульсной сжатой сварочной дуге немногочисленны и касаются главным образом ее устойчивости и тепловых характеристик. Установлено, что импульсный режим позволяет устойчиво работать (без двойного дугообразования) на токах, значительно превышающих ток стационарного режима. Это, в свою очередь, дает возможность производить плазменную обработку при более высоких параметрах плазмы (температуре, скорости, энтальпии и т.д.) [34,45].

Доказано, что тепловая эффективная мощность и эффективный КПД сжатой дуги при модуляции тока выше, чем для стационарной дуги при том же среднем значении тока. Модуляция тока влияет на осредненное во времени распределение теплового потока по аноду. Повышение частоты модуляции снижает плотность потока в центре и увеличивает диаметр пятна нагрева.

К противоположному выводу пришел В.П. Токмаков, изучая тепловые характеристики импульсной плазменной струи. Он считает, что по концентрации теплового потока импульсная плазменная струя приближается к электронному лучу и намного превосходит все мощные стационарные электрические дуги. Распределение удельного теплового потока импульсной плазменной струи по пятну нагрева удовлетворительно описывается кривой нормального распределения. При прямой полярности струя более сжата, имеет несколько больший коэффициент сосредоточенности и меньший диаметр пятна нагрева, чем при обратной полярности. Увеличение амплитуды импульса приводит к возрастанию максимального удельного теплового потока на оси струи. Условный диаметр пятна нагрева при этом несколько уменьшается. Для стационарной плазменной струи величина диаметра пятна нагрева почти не зависит от тока [76].

Распределение плотности тока по аноду в импульсном режиме следует практически синфазно за изменением тока сжатой дуги. При одиночных импульсах наблюдается сдвиг во времени между током импульса и плотностью тока в пятне. Поэтому постоянная времени, характеризующая переходные процессы дуги в плазмотроне при одиночном импульсе тока, по-видимому, больше, чем при горении дуги в режиме модуляции.

Анализируя условия существования импульсного сжатого дугового разряда, отметим, что при горении сжатой дуги в режиме модуляции тока, по-видимому, могут быть созданы условия для ее дополнительного контрагирования и соответственно расширения технологических возможностей, в том числе и проплавляющей способности [30].

Известно, что при определенных скоростях изменения тока наблюдается фазовый сдвиг между изменением тока разряда и его параметрами (размером столба, пятен дуги, температурой и пр.). Это обусловлено тем, что тепловые процессы играют определенную роль в динамике развития разряда. Тепловая постоянная времени столба дуги определяется главным образом теплофизическими параметрами плазмы и внешними условиями (обдувом дуги, геометрией сопла и др.), в то время как постоянная времени развития пятен - параметрами материала электродов, их размерами и геометрией [30].

При питании дуги повторяющимися импульсами тока время установления устойчивого разряда определяется полнотой протекания процессов ионизации в течение импульса тока и деионизации во время паузы, которые, в свою очередь, зависят от энергетических и временных характеристик процесса. Поэтому можно предположить, что если длительность протекания тока импульса будет меньше длительности перехода сжатого дугового разряда в устойчивое состояние, то диаметр активного пятна на металле не достигнет величины, соответствующей мгновенным значениям тока и напряжения импульсов, и сжатый дуговой разряд будет характеризоваться большим контрагированием, а следовательно и большей

проплавляющей данные по свободной дуге с вольфрамовым электродом в аргоне Г.А. Славина и Е.А. Столпнера. Ими показано, что при питании свободной дуги кратковременными импульсами тока ее горение переходит в динамический режим. Проплавляющая способность такой дуги более чем на 30% выше, чем постоянно горящей дуги [47].

### 1.8 Распространение тепла при импульсной сварке тонколистовых деталей

Расчеты тепловых процессов при сварке пульсирующей дугой намного сложнее, чем стационарной дугой. Для расчета размеров шва в установившемся процессе можно использовать уравнения и формулы, полученные для стационарных дуг. При этом необходимо определять усредненную эффективную мощность дуги. Наиболее оптимальным для сварки тонколистовых материалов, которые преимущественно свариваются такой дугой является схема движущегося точечного источника тепла на поверхности плоского слоя (пластины). Формула для определения приращения температур имеет вид. [82]

Формула для расчета приращения температур  $\Delta T$  в точке пластины от действия такого источника тепла имеет вид [29]

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{2q_{и}}{c\rho(4\pi a)^{1,5}} e^{-\frac{x \cdot V_C}{2a}} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \int_0^{\infty} \frac{dt}{t^{1,5}} \cdot e^{-\frac{V_C^2 \cdot t}{4a} \frac{[x^2 + y^2 + (z - 2n\delta)^2]}{4at}}, \quad (5)$$

где  $T$  – температура точки пластины, °С,  $T_0$  – начальная температура пластины, °С,  $q_{и}$  – эффективная мощность источника тепла, Вт,  $c\rho$  – объемная теплоемкость материала пластины, Дж/(см<sup>3</sup> °С),  $a$  – коэффициент температуропроводности пластины, см<sup>2</sup>/с,  $x$  – координата в направлении движения источника тепла, отсчитываемая от источника тепла, см,

$V_C$  – прыть перемещения родника тепла, см/с,  $t$  – текущее время с эпизода истока деяния и перемещения родника тепла, с,  $y$  – эфемериды,

перпендикулярная течению перемещения родника тепла, отсчитываемая от родника тепла, см,  $z$  – эфемерида, перпендикулярная течению перемещения родника тепла и плоскости пластинки, на которой работает родник тепла, см,

$\delta$  – толщина пластинки, см,  $n$  – целые количества от  $-\infty$  по  $+\infty$ .

Определенное численность количеств  $n$  задает количество членов ряда (численность интегралов), которое необходимо определить. Оно находится в зависимости от требуемой точности вычислений крайнего члена ряда в формуле (5). Нежели более количество  $n$  сообразно безусловной величине, тем не в такой мере крайний интеграл ряда. То имеется разряд в (5) встречающийся. Пунктуальность вычисления температуры в точке скоро увеличивается с повышением  $n$  сообразно безусловной величине. При вычислении температур лимитирование количества  $n$  делается поручением дела крайнего члена ряда к сумме всех прошлых членов ряда. При расчетах температур в сталях и дюралевых сплавах количество  $n=N$  никак не превосходит 10 сообразно безусловной величине. 1-ый член ряда рассчитывается при  $n=0$  и количество  $n$  прекращают усиливать сообразно безусловной величине, как скоро достигается необходимая пунктуальность вычислений температуры. Потому разрешено советовать при вычислениях сообразно формуле (5) ограничить количество  $n= \pm 10$ . Наверное даст нужную пунктуальность вычислений температуры, как для сварки сталей, этак и дюралевых сплавов.

Высокий граница интегрирования медли  $t$  выбирается таковым, чтоб температурное поле в пластинке было установившемся (квазистационарным). Наверное это положение температурного поля, как скоро температура всех точек тела в зоне сварки меняется на пренебрежимо маленькую значение. При этом состоянии бездна проплавления и широта шва добиваются номинальных значений с высочайшей точностью. Смысл  $t$ , как и смысл  $n$ , выбирается исходя из требуемой точности вычислений. Опыты и подсчеты демонстрируют, будто в критериях двухсторонней сварки стыковых соединений (толщина пластинок 6-8 мм) это положение достигается приблизительно из-за 10 секунд для сталей

и 15 секунд для дюралевых сталей с совсем высочайшей условной точностью расчета температуры никак не ниже 0,1%. Потому разрешено советовать при вычислениях сообразно формуле (5) ограничить высокий граница интегрирования в интегралах 15 секунд. Наверное даст нужную пунктуальность вычислений температуры, как для сварки сталей, этак и дюралевых сплавов и остальных сплавов.

Величину эффективной мощности  $q_{и}$  в формуле (5) для сварочной дуги следует определять по формуле

$$q_{и} = I \cdot q_{у}, \quad (6)$$

где  $I$  – ток сварки (дуги), А;

$q_{у}$  – удельная эффективная мощность дуги, равная частному от деления экспериментального значения эффективной мощности на ток сварки, Вт/А.

Из формулы (5) видно, что температура точек тела пропорциональна эффективной мощности источника тепла и обратно пропорциональна объемной теплоемкости пластины. Поэтому температура будет пропорциональна отношению этих величин. Это позволяет определять экспериментально и использовать в дальнейшем в формуле (5) не каждую из этих величин по отдельности, а их отношение, и в дальнейшем оперировать этим отношением. Обозначим этот отношение  $Q$

$$Q = q_{у}/c_{р}. \quad (7)$$

Размерность коэффициента  $Q$  –  $(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})/(\text{А} \cdot \text{с})$ . При умножении  $Q$  на ток сварки  $I$  получим размерность  $(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})/(\text{с})$ .

В данном случае выходит, будто в формуле (5) остаются лишь 2 безызвестных: коэффициент пропорциональности  $Q$  и коэффициент температуропроводности  $a$ . Для их однозначного определения на номинальном (эталонном) режиме необходимо ведать 2 независящие температуры в 2-ух точках тела при узнаваемых координатах данных точек  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . [83,84] Тогда из формулы (1.5) разрешено собрать систему уравнений условно безызвестных коэффициентов. Этак как понятно, будто на границе шва с главным сплавом при сварке температура постоянно одинакова

температуре плавления, разрешено применять ширину шва и глубину проплавления для отыскания неизменных коэффициентов  $Q$  и  $a$  в формуле (5), а потом использовать данные коэффициенты при расчете температур в продукте. При этом обеспечивается высокая точность, так как полученные коэффициенты изменяются очень незначительно при отклонении параметров сварки в достаточно значительном диапазоне. Такой подход к расчету температур при сварке не по использованию калориметрической эффективной мощности, а по найденной по математической модели, называют методом приведения [62].

### 1.10 Методы расчета энергетических характеристик сжатой дуги в среде аргона

При оценке влияния мощности, переносимой плазмообразующим аргоном, можно использовать формулу для расчета среднего теплового потенциала  $S_C$  по длине канала сопла [54]

$$S_C = 1,47 \cdot 10^{-2} \left(\frac{I}{R_C}\right)^{\frac{4}{3}} \left\{ \left[ 1 - \exp\left[\frac{12\pi\lambda z}{C_p \cdot G_{\text{п}}}\right] \right] \right\}^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

где  $S_0$  - средний тепловой потенциал начальной проводимости аргоновой плазмы, Вт/см;  $I$  – ток дуги, А;  $R$  – радиус цилиндрического канала сопла, см;  $\lambda$  - теплопроводность аргона;  $C_p$  – теплоемкость (Дж/г°С);  $z$  – координата по оси сопла от начального сечения, см. [17]

Тепловой потенциал аргона – функция от зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda$  аргона от температуры, позволяющая учесть его нелинейность в дифференциальном уравнении баланса энергии [76]

$$S = \int_0^T \lambda(T) dT \quad (9)$$

Напряженность электрического поля в канале сопла определяется по формуле

$$E(z) = 0,37 \cdot \frac{I^{\frac{1}{3}}}{R^{\frac{4}{3}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi z}{10G_{\text{п}}}\right) \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

Коэффициент 10 в формуле (9) заменяет отношение  $12\lambda/C_p$  в формуле (10), которое мало зависит от теплового потенциала аргона  $S$ .

Полное напряжение в канале сопла рассчитывается интегрированием выражения (10) в пределах от 0 до  $z=L_c$ . Здесь  $L_c$  – длина цилиндрического участка канала сопла, см.

Теплоотвод на единицу длины стенки сопла (Вт/см) определяется по формуле

$$Q_s = 8\pi S_c(z) \quad (11)$$

Полная мощность, отводимая в сопло плазмотрона на цилиндрическом участке сопла, также определяется интегрированием (11) в пределах от 0 до  $z=L_c$ .

Мощность, поглощаемая плазмообразующим аргоном на сжимающем участке сопла, равна разности электрической мощности  $P_c$  и теплоотвода в сопло  $Q_c$

$$P_\Gamma = P_c - Q_c \quad (12)$$

Зная средний тепловой потенциал аргона  $S_c$  в сечении сопла можно рассчитать толщину непроводящей прослойки, между соплом и столбом дуги, так как при выводе формулы (8) предполагалось, что тепловой потенциал в сечении распределен по параболическому закону. Отношение падения напряжения в канале сопла к толщине изолирующей прослойки в сечении в котором возникает катодная область двойной дуги, является критерием аварийного режима и может использоваться для расчетно-экспериментального определения безаварийных режимов плазмотрона.

Кроме того формулы (8-12) позволяют рассчитать среднее газокинетическое давление струи плазмообразующего аргона. Для этого по мощности, поглощенной плазмообразующим аргоном из (12) и его расходу нужно сначала определить теплосодержание газа, а затем с помощью давление струи  $P_v$  можно рассчитать по формуле

$$P_v = \rho_\Gamma V_\Gamma^2 / 2, \quad (13)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газа при расчетной энтальпии, г/см<sup>3</sup>,  $V_{\Gamma}$  – среднемассовая скорость газа, см/с.

Скорость газа можно найти с помощью формулы для удельного (плотности) затрат газа  $g$ , аналогичного плотности тока в канале сопла

$$g = \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}, \quad (14)$$

Удельный затрат газа  $g$  в канале сопла легко определяется по полному расходу газа  $G$

$$g = 4G / \pi d_c^2, \quad (15)$$

где  $d_c$  – диаметр канала сопла, см.

После несложных преобразований легко установить, что давление струи пропорционально квадрату затрат газа и обратно пропорционально диаметру сопла в четвертой степени. То есть наибольшее влияние на давление оказывает диаметр сопла. При этом необходимо учитывать, что плотность газа  $\rho_{\Gamma}$  зависит от всех параметров: диаметра и длины сопла, тока и затрат защитного газа.

### 1.11 Задачи работы

Из выполненного обзора следует, что перспективным технологическим процессом сварки тонколистовых алюминиевых сплавов является сварка пульсирующей свободной дугой переменного тока с вольфрамовым электродом. Одной из установок, обеспечивающих этот способ сварки MagicWave 5000 Job AC/DC приобретена базовым предприятием. Использование в данной установке достижений микропроцессорной техники позволяет существенно повысить качество сварных соединений и снизить трудоемкость отработки технологий. Также значительными достоинствами обладают сжатые дуги переменного тока. Наиболее важным из них применительно к сварке тонкостенных конструкций является высокая пространственная устойчивость дуги. Однако применение пульсирующих режимов для сжатой дуги переменного тока практически не изучено. Поэтому

в соответствии с целью данной работы на основе проведенного анализа можно сформулировать задачи работы.

1. Разработать конструкцию экспериментального плазмотрона для использования на установке MagicWave 5000 Job AC/DC.
2. Провести испытания экспериментального плазмотрона и внести улучшения в его конструкцию.
3. Определить возможность зажигания и горения сжатой пульсирующей дуги от установки MagicWave 5000 Job AC/DC.
4. Исследовать некоторые энергетические и технологические свойства сжатой пульсирующей дуги, горящей на алюминиевый сплав.

## 2 Экспериментальное оборудование и методики исследований

### 2.1 Установка для проведения экспериментальных исследований

На рис. 19 показан разработанный экспериментальный стенд, в состав которого входят: сварочный стол welding table tvn spec со стационарной вытяжной системой [50], сварочный трактор FDV 22 MF [51], источник питания MagicWave 5000 Job AC/DC[49], баллон с аргоном высшего сорта [73], газовый редуктор с двумя расходомерами (ротаметрами), плазмотрон, устройство корректировки положения плазмотрона.



Рисунок 19 – стенд для испытаний

Технические характеристики сварочного трактора FDV 22 MF (рис. 20) представлены в табл. 1.



Рисунок 20 – внешний вид сварочного трактора FDV 22 MF

Таблица 1 – Технические характеристики сварочного трактора FDV 22 MF

Технические данные	FDV 22/MF
Макс. нагрузка	22 кг
Тяговая сила (горизонтально/вертикально)	220 Н / 120 Н
Положение сварки	PA, PB, PC, PF, PG
Скорость перемещения	5-110 см/мин
Настраиваемый диапазон перемещения горелки (горизонтально/вертикально)	28 мм / 28 мм
Источник питания	14,4 VDC
Вес нетто (без батареи)	14 кг

Из табл. 1 следует, что диапазон возможных скоростей сварки очень велик, сварку можно выполнять в различных пространственных положениях, также достаточно велик диапазон перемещения сварочной горелки.

Технические характеристики источник питания MagicWave 5000 Job AC/DC (рис. 21) представлены в табл. 2.



Рисунок 21– Внешний вид источника питания MagicWave 5000 Job

Таблица 2– Технические характеристики источника MagicWave 5000 Job

Технические данные	
Сетевое напряжение	3 x 400 В
Допуск по напряжению сети	+/- 15 %
Частота сети	50/60 Гц
Сетевой предохранитель (инерционный)	35 А
Первичная эксплуатационная мощность (100% ПВ)	17,9 кВА
cos φ«фи»	0,99
Диапазон сварочного тока	3-500 А
Сварочный ток 10 мин/40°C (104°F) 100% ПВ	350 А
Напряжение холостого хода	86 В
Рабочее напряжение	10,1-30,0 В
Напряжение зажигания дуги	9,5 кВ
Класс защиты	IP 23
Вид охлаждения	водяное
Класс изоляции	F
Размеры, Д/Ш/В, мм	625 / 290 / 705
Вес	58,2 кг

При рассмотрении технических характеристик источника питания в табл. 2 обращает на себя внимание очень широкий диапазон рабочих токов и достаточно высокое напряжение холостого хода. Последнее позволяет надеяться, что источник вполне может быть использован для питания сжатой дуги.

Сварочный инвертор для аргодуговой сварки постоянным и переменным током MagicWave 5000 Job MV (TIG) AC/DC с полностью цифровым управлением. Аппарат может производить импульсную сварку, имеет функцию памяти, может коммутироваться с автоматическими системами. Аппарат может производить импульсную сварку на переменном однофазном токе, а также сварку разнополярными асимметричными токами с прямоугольной формой волны. Имеет функцию ячеек памяти (job) и имеет возможность подключение к LAN сети для передачи данных сварочного процесса.

Сварочная установка укомплектована двумя горелками – для сварки вольфрамовым электродом (рис.22 и рис 23.) и для механизированной сварки плавящимся электродом. В горелке для сварки вольфрамовым электродом используются керамические сопла, которые с помощью резьбы крепятся на корпусе горелки. Данная горелка использовалась как основная часть при проектировании опытных плазмотронов.



Рисунок 22 – Внешний вид горелки с керамическим соплом



Рисунок 23 – Рабочая часть сварочной горелки без керамического сопла

Сварочная горелка серии TTW предназначена для аргонодуговой сварки и имеет водяное охлаждение корпуса и съемное керамическое сопло для защиты зоны сварки. Применяется для сварки высоколегированных сталей, титановых сплавов, ответственных соединений на углеродистых сталях и для сварки алюминиевых сплавов. Помимо стандартной конструкции, в сварочной горелке установлена плата JobMaster для удобного переключения между программами Job.

Таблица 3– Технические характеристики горелки для ручной сварки

Сварочный ток [переменный ток]	400 А при ПВ 60%
Сварочный ток [постоянный ток]	500 А при ПВ 60%
Диаметр электрода	1-4мм
Вид охлаждения	водяное
Тип охлаждения	принудительное
Длина шлангов	4000 мм
Масса	0,99 кг

Сварочная горелка использовалась для исследований формы свободной сварочной дуги в непрерывном и пульсирующем режиме.

Регулировка давления защитного и плазмообразующего газа происходила за счет специального редуктора с двумя ротаметрами (рис. 24).



Рисунок 24 – Редуктор газовый двумя ротаметрами

## 2.2 Экспериментальные плазмотроны

Для исследований были разработаны и изготовлены плазмотрон ПРДС-1 (рис. 25а) и ПРДС-2 (рис. 25б), технические характеристики которых представлены в табл. 3.

При разработке и проектировании плазмотронов ПРДС-1 и ПРДС-2 применялась программа Dassault Systèmes, CATIA V5. Для основных элементов плазмотрона была выбрана латунь марки Л63 а отдельные элементы сопла и подводимые трубки были выполнены из медно-цинково-никелевого (нейзильбер) сплава.

Для изоляции сопла от общей электрической цепи оно было изготовлено из фторопласта-4 марки С.

Из-за сложности конструкции было принято решение произвести пайку некоторых частей. Процесс пайки протекал в несколько этапов.

1. Подготовка поверхностей перед пайкой, заключалась в их обезжиривании с помощью хладона 113. После высыхания обезжиривателя на паяемые поверхности наносилась паяльная паста XG-50, после чего узел собирался.

2. Пайка. Пайка происходила в печи с режимом 200 °С и выдержкой при этой температуре в течение 10 мин. После чего изделие остывало на воздухе до комнатной температуры.

После испытания плазмотрона ПРДС-1 был выявлен ряд недостатков конструкции:

- 1 недостаточная защита сварного шва;
- 2 защитный газ и плазмообразующий газ должны подаваться по отдельным каналам;
- 3 для улучшения стабилизации плазменной струи лучше использовать завихрение плазмообразующего газа.



а – ПРДС-1



б – ПРДС-2

## Рисунок 25 – Внешний вид плазмотронов

Таблица 4 – Технические характеристики плазмотронов

№	Параметры	ПРДС-1	ПРДС-12
1	Род тока	переменный, постоянный (прямая полярность)	переменный, постоянный (прямая полярность)
2	Максимальный ток, А	200	160
3	Плазмообразующий газ	аргон	аргон, азот
4	Защитный газ	аргон	аргон
5	Завихрение плазмообразующего газа	нет	есть
6	Раздельная подача защитного и плазмообразующего газа	нет	есть
7	Расход газа защитного газа, л/мин	3-16	3-16
8	Расход газа плазмообразующего газа, л/мин	-	0,2-5
9	Охлаждение плазмотрона	принудительное	принудительное
10	Охлаждающая жидкость	вода	вода
11	Давления охлаждающей жидкости на входе в плазмотрон, кгс/кв. см	1,5-3,0	1,5-3,0
12	Расход охлаждающей жидкости, л/мин	5,0	5,0
13	Диаметр канала сопла, мм	3,8	5,0
14	Масса плазмотрона без шлангового пакета, кг, не более	0,4	0,5

### 2.2.1 Степень защиты сварочной ванны плазмотроном ПДРС

Система подачи защитного и плазмообразующего газа устроена таким образом (рис.26, рис.27), что аргон подается от баллона через редуктор с ротаметром, после чего по трубкам подается в горелку и разделяется в сопле на защитный и плазмообразующий. Площадь отверстий для защитного газа составляет 10,8 мм<sup>2</sup> (2 отверстия Ø 1,4мм, 3 отверстия Ø 1,6мм), а площадь отверстия для плазмообразующего газа составляет 11,3 мм<sup>2</sup> (отверстие Ø 3,8мм). То есть площадь отверстий для защитного и плазмообразующего аргона почти одинакова. Это должно обеспечивать их равный расход, учитывая то, что сжатая сварочная дуга в канале сопла оказывает газу некоторое сопротивление.

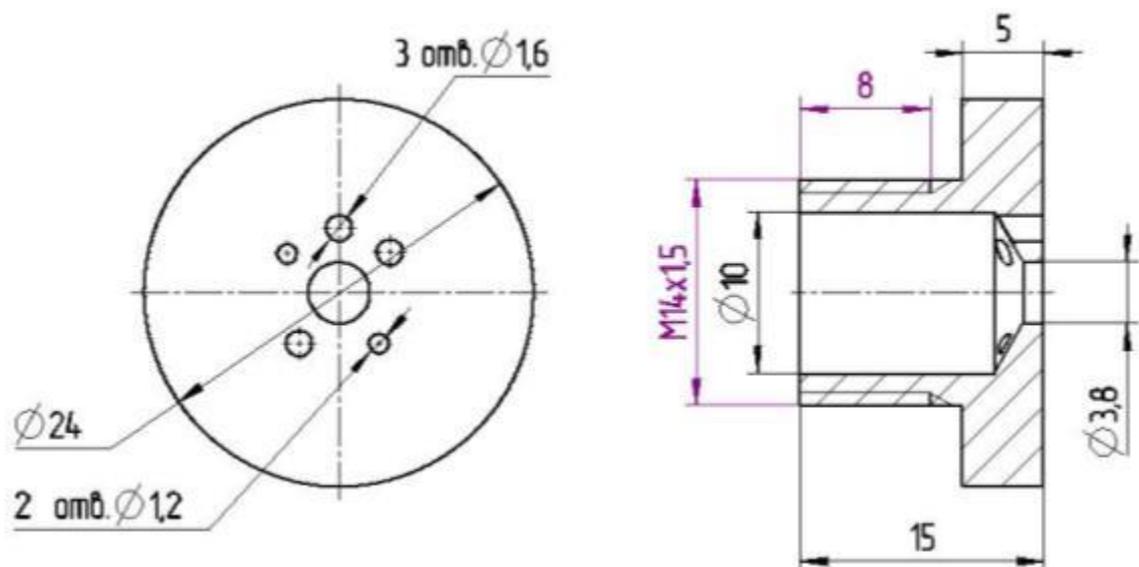


Рисунок 26– Схема нижней части плазмотрона с размерами



Рисунок 27– Внешний вид плазмотрона ПТРС-1 с торца

Для определения степени защиты сварочной ванны через плазмотрон был продут сигаретный дым, результат представлен на рис. 28.



Рисунок 28 – Струя газа при продувке дымом

Как видно на рис. 28, при осевой подаче газа и расположении отверстий по контуру струи газа перемещаются отдельно, между ними наблюдаются зоны без защитного газа. Эти зоны находятся на расстоянии, при которых ведется сварка и в этих зонах возможно окисление свариваемого материала. В то же время течение газа ламинарное и при правильном расположении отверстий может быть обеспечена нормальная защита шва.

Испытания плазмотрона ПТРС-1 проводили по двум вариантам: на дуге прямого действия и на дуге косвенного действия.

Первое испытания на дуге прямого действия на стали 09Г2С толщиной  $S=14$  мм, диаметр сопла 2 мм проводилось при токе 40 А, расход аргона 3л/мин, сварочная дуга горела 5 с. Получили диаметр точки 4,6 мм глубина лунки на оси точки 1мм, Второе испытание на 50 А, расход аргона 4л/мин, горение дуги 5 с, диаметр точки 4,8 мм глубина лунки на оси точки 1,2мм цвет зоны вокруг точки белый. Можно сделать вывод, что при горении дуги прямого действия образуется лунка и происходит вытеснение материала за счет большого сжатия дуги вследствие малого диаметра сопла горелки.

Второй вид испытания на дуге косвенного действия на стали 09Г2С толщиной  $S=14$  мм, диаметр сопла 2мм проводился в виде двух опытов:

1) 50 А, горение дуги 10 с, расход аргона 4л/мин, диаметр точки 3,7 мм, цвет зоны рядом с точкой черный,

2) 50 А, горение дуги 10 с, расход аргона бл/мин, диаметр точки 4,5 мм , цвет зоны рядом с точкой черный. На этом режиме получилось короткое замыкание между цангой и соплом.

### **2.2.2 Степень защиты сварочной ванны плазмотроном ПРДС-2**

Система подачи защитного и плазмообразующего газа устроена таким образом, что газ аргон подавался от баллона через редуктор с двумя ротаметрами. После чего по трубкам подается отдельно для плазмобразования и в сопло плазмотрона для защиты сварочной ванны. Площадь отверстия для защитного газа составляет  $25\text{мм}^2$ , а площадь отверстия для плазмообразующего газа составляет  $19,5\text{ мм}^2$  (отверстие  $\text{Ø } 5\text{мм}$ ) ( рис.29, рис.30 ).

Для проведения опыта по исследованию степени защиты сварочной ванны был продут сигаретный дым через горелку, результат представлен на рис.23.

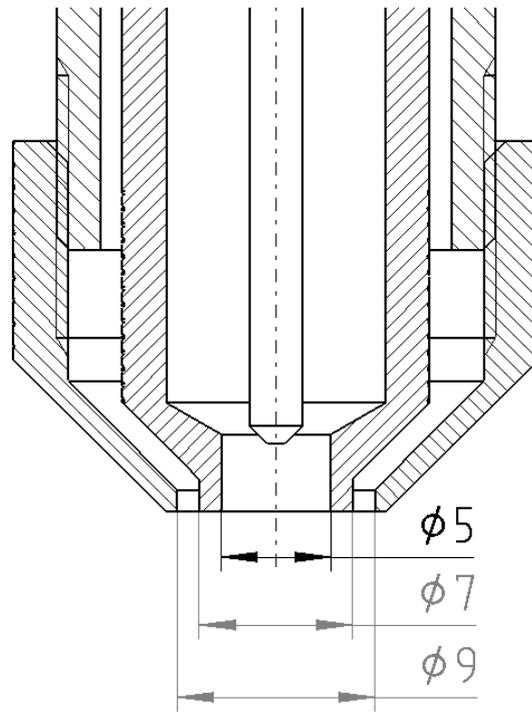


Рисунок 29– Схема нижней части плазмотрона с размерами



Рисунок 30– Струя газа при продувке дымом

У плазмотрона ПТРС-2 защита зоны сварки происходит по другому по сравнению с осевой подачей газа. Газ из защитного сопла истекает в виде

конуса, зона защиты расширяется по сравнению с выходным диаметром сопла. Форма струи достаточно стабильна.

### **2.3 Сварочные материалы**

Для изучения сжатой дуги на переменном токе, были использованы следующие материалы.

#### **2.3.1 Вольфрамовый электрод ЭВЛ-20 [12]**

Электроды из сплава вольфрама с оксидом лантана имеют совсем простой начальный пуск дуги, невысокую расположенность к прожогам, стабильную дугу и хорошую характеристику повторного зажигания дуги.

Прибавление 2,0% оксида лантана усиливает наибольший ток, несущая способность электрода приблизительно на 50% более для предоставленного типоразмера при сварке на переменном токе, нежели кристалльно вольфрамового. Сообразно сопоставлению с цериевыми и ториевыми, лантановые электроды имеют наименьший износ рабочего конца электрода. Лантановые электроды наиболее надежны и не в такой мере засоряют вольфрамом сварной шов. Оксид лантана умеренно распределен сообразно протяженности электрода, будто позволяет долгое время беречь при сварке начальную заточку электрода. Наверное суровое превосходство при сварке на неизменном (непосредственной полярности) либо переменном токе от улучшенных источников сварочного тока, сталей и нержавеющей сталей. При сварке на переменном синусоидальном токе рабочий конец электрода обязан обладать сферическую форму.

#### **2.3.2 Пластины из алюминиевого сплава марки АМг5**

Для опытов использовали пластины размерами 150x150x2мм [13].

Основным преимуществом алюминиевого сплава АМг5 считается отличная сбалансированность технических характеристик. Он обладает

хорошей коррозионной стойкостью (уверенно противостоит воздействию пресной и морской воды), пластичностью и прочностью. Марка АМг5 легко поддается механической обработке на фрезерных и токарных станках, но деформация под давлением требует дополнительного отжига. Отжиг проводится при температуре 305-340 °С в течение 1-2 часов с последующим охлаждением на воздухе [13].

Сплав АМг5 характеризуется удовлетворительной прочностью, низкой твердостью, пределом текучести и модулем упругости. Слабо противостоит межкристаллитной коррозии, под воздействием напряжения. Отлично сваривается, оптимальным способом служит точечная сварка. Алюминиевая продукция весит почти в три раза меньше стальных изделий, что является важным преимуществом в ряде отраслей народного хозяйства (авиастроение, космическая промышленность и другие). Химический состав приведен в табл. 4 [61].

Физические свойства материала при температуре 20 °С:

- модуль упругости первого рода  $0,71 \cdot 10^5$  МПа;
- плотность 2650 кг/м<sup>3</sup>;
- твердость НВ 10-1 – 65 МПа;
- удельное электросопротивление  $64 \cdot 10^9$  Ом·м

Таблица 5 – Химический состав АМг5, %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примесей
до 0.5	до 0.5	0.3-0.8	0.02-0.1	91.9-94.68	до 0.1	0.0002 - 0.005	4.8 - 5.8	до 0.2	прочие, каждая 0.05; всего 0.1

### 2.3.3 Защитный газ [73]

В качестве плазмообразующего и защитного газа используется газ аргон (Ar) высокой чистоты.

### **3. Исследование технологических свойств сжатой пульсирующей сварочной дуги в аргоне переменного тока**

Изучение технологических свойств сжатой пульсирующей сварочной дуги в аргоне переменного тока проводилось исследования для каждого из плазмотронов.

1. Влияние длины дуги на ширину зоны катодного распыления и ширину шва;
2. Исследование разрывной длины дуги;
3. Зависимость напряжения от длины открытого участка дуги;
4. Исследование прочности сварного шва.

#### **3.1 Влияние длины дуги на ширину зоны катодного распыления и ширину шва**

Влияние длины видимого участка дуги в период горения дуги, при переменном токе на ширину зоны катодного распыления. Эксперименты проводили на алюминиевой пластине АМГ-5 толщиной 2 мм для двух плазмотронах ПРДС-1 и ПРДС-2.

Подключенный к источнику питания плазмотрон устанавливали на сварочный трактор в зажимы и выставляли длину открытого участка сжатой дуги  $L_0 = 2$  мм. Параметры сварки приведены в табл. В дальнейшем увеличивали видимый участок дуги с помощью механизма подъёма зажима, установленного на сварочном тракторе. Зазор контролировали специальным щупом [72] (рис. 31).



Рисунок 31 – Шуп №4 100 мм по ТУ2-034-225

После проведения испытаний измеряли ширину катодного распыления и сварного шва с помощью штангенциркуля ШЦ-150-0,05.

Для проведения исследования по зависимости ширины шва и зоны распыления от длины дуги при сварке алюминия было проведено 5 опытов (рис.33-37) с импульсным режимом сварки указанных в таблице 5 и на рис. 32.

Таблица 6 – Режимы сварки

Параметры	Значения
Режим сварки	импульсный
Сварочный ток ( $I_{св}$ ), А	80
Базовый ток, А	40
Частота импульса, Гц	1
Рабочий цикл импульса, %	50
Скорость движения тележки ( $V_{св}$ ), см/мин	20
Род тока	переменный
Диаметр вольфрамового электрода, мм	2,4
Расход плазмообразующего газа, л/мин	5
Расход защитного газа, л/мин	12

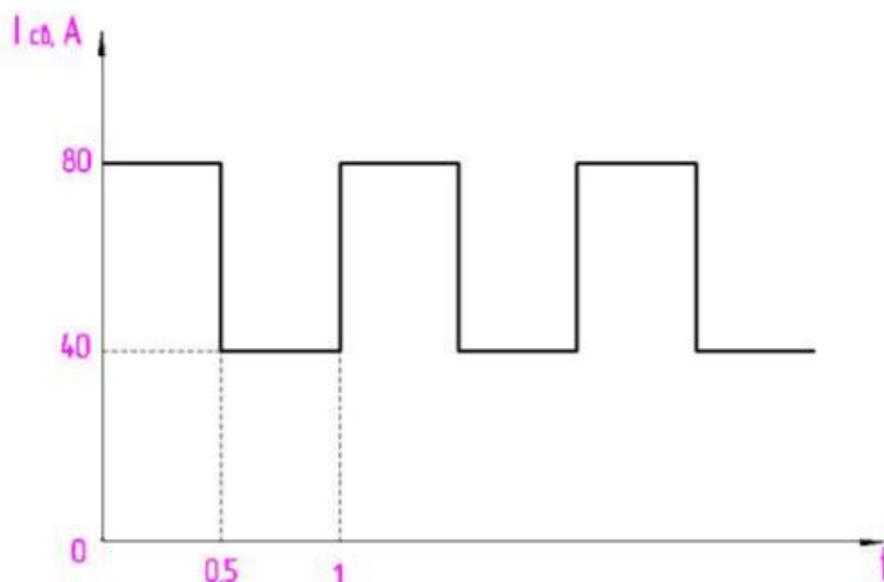


Рисунок 32 –Циклограмма импульсного тока при наплавке. Время сварки  $t$  в секундах

Внешние виды наплавки плазмотроном ПРДС-1 представлены на рис. 33-37.

Внутри каждой части цикла происходит изменение тока по синусоидальному закону.



Рисунок 33– Внешний вид наплавки после опыта №1.  $L_0=2\text{мм}$



Рисунок 34– Опыт №2,  $L_0=3\text{мм}$



Рисунок 35– Опыт №3,  $L_0=4\text{мм}$



Рисунок 36– Опыт №4,  $L_0=5$  мм



Рисунок 37– Опыт №5,  $L_0=6$  мм

При превышении длины открытой части дугового промежутка больше 6мм дуга не загоралась. Анализ результатов показал, что с увеличением дистанции между соплом плазмотрона и деталью внешний вид наплавленного шва ухудшается, появляются поры, включения черного цвета. Это, скорее всего, связано с ухудшением защиты сварочной ванны от воздуха.

По измеренным значениям ширины зоны катодного распыления и шва были построены зависимости (рис. 38).

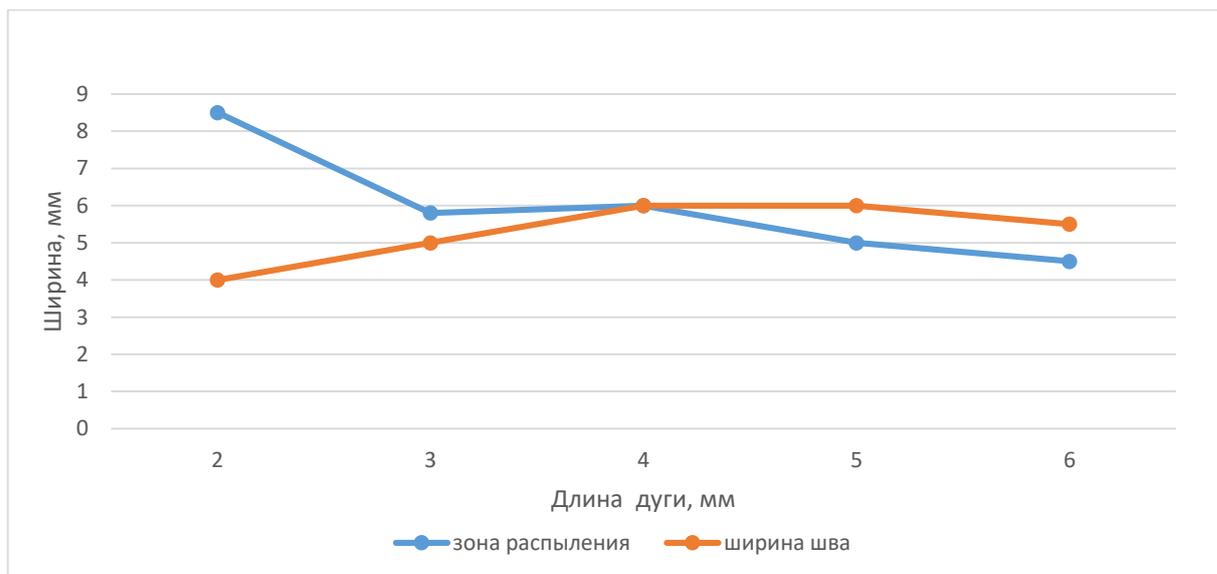


Рисунок 38– Зависимость ширины шва и ширины зоны распыления от длины открытого участка дуги для плазмотрона ПРДС-1

При длине открытого участка дуги до 4 мм обеспечивается превышение зоны распыления над шириной шва.

Внешние виды наплавов плазмотроном ПРДС-2 представлены на рис. 39-43.



Рисунок 39– Опыт №1 – внешний вид наплавки.  $L_0=1\text{мм}$



Рисунок 40– Испытания №2 – внешний вид наплавки.  $L_0=2\text{мм}$



Рисунок 41– Испытания №3 – внешний вид наплавки.  $L_0=3\text{мм}$



Рисунок 42– Испытания №4 – внешний вид наплавки.  $L_0=4,5\text{мм}$



Рисунок 43– Испытания №5 – внешний вид наплавки.  $L_0=6\text{мм}$

По рисункам видно, что второй плазмотрон на тех же режимах обеспечивает более качественное разрушение окисной пленки и защиту сварного шва от воздуха.

По данным проведенных опытов были построены графики (рис.44)

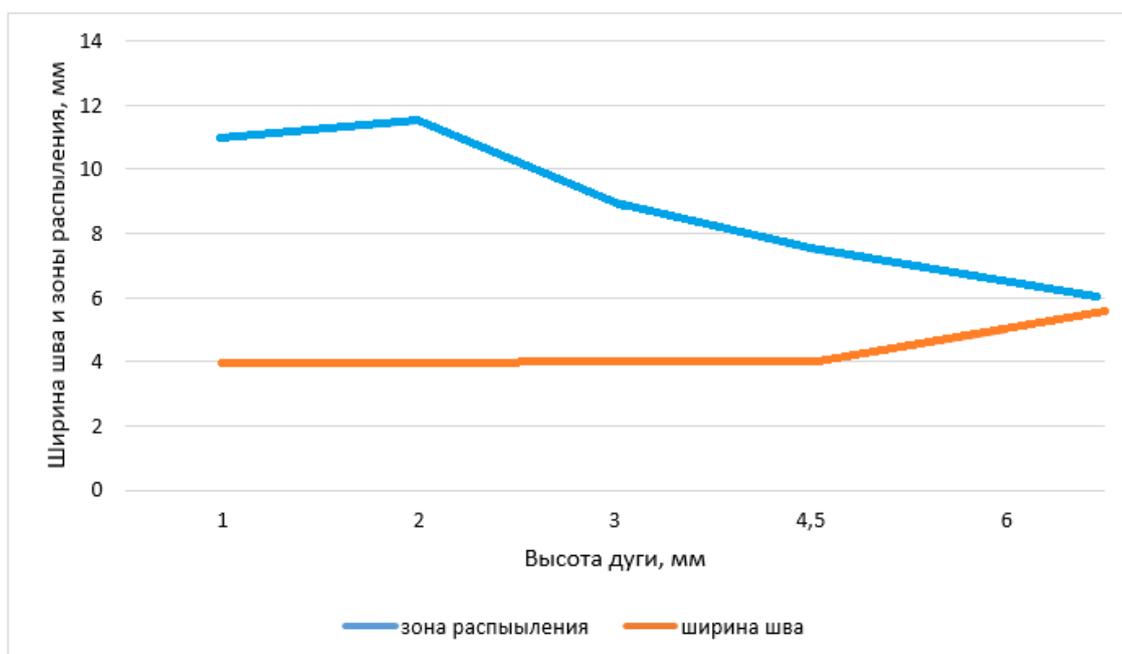


Рисунок 44— Зависимость ширины шва и зоны распыления от длины открытого участка сжатой дуги для плазмотрона ПРДС-2

При превышении длины открытой части дугового промежутка больше 15мм, дуга начинает гореть не стабильно, прерывисто, во время импульса загоралась, а во время паузы гасла.

По внешнему виду зоны катодной очистки поверхности можно отметить, что она намного больше ширины зоны расплавления, что обычно не присуще аргонодуговой сварке свободной дугой. Такое явление можно объяснить значительной зоной протекания тока за счет переноса заряженных частиц плазменной струей на периферию дуги. С одной стороны валика граница зоны распыления ровная, прямая, а с другой, наоборот, — подвержена существенным изменениям. Это может быть связано с неравномерным растеканием плазмообразующего аргона с одной стороны сопла. Поэтому при проектировании плазмотронов в будущем этому аспекту необходимо уделять внимание. Средняя ширина зоны очистки примерно одинакова с обеих сторон валика.

По мере начала движения дуги зона катодной очистки расширяется вместе с увеличением ширины шва. Увеличение ширины шва происходит

вследствие перехода процесса наплавки в стационарный режим, идет процесс подогрева детали. Из этого можно заключить, что подогрев детали способствует и расширению зоны катодной очистки.

### 3.2 Исследование разрывной длины дуги

Для проведения исследований разрывной длины сжатой пульсирующей дуги на переменной токе использовался плазмотрон ПРДС-2, так как у него лучше обеспечивается защита зоны сварки от воздуха. Плазмотрон закрепляли с помощью зажима на сварочном тракторе. Для проведения опытов использовали алюминиевую пластину из сплава АМГ-5 [13] и вначале длина открытого участка дуги составляла 2мм. В дальнейшем ее вручную плавно увеличивали до полного погасания дуги с помощью механизма подъёма зажима, установленного на сварочном тракторе. Длина открытого участка дуги контролировалась специальным щупом (рис. 21).

Для проведения исследования разрывной длины дуги было проведен опыт с пульсирующим режимом сварки, указанным в табл. 7.

Таблица 7 – Режимы сварки

Параметры	Значения
Режим сварки	импульсный
Сварочный ток ( $I_{св}$ ), А	50
Базовый ток, А	25
Частота импульса, Гц	1
Рабочий цикл импульса, %	50
Род тока	переменный
Диаметр вольфрамового электрода, мм	2,4
Расход плазмообразующего аргона, л/мин	5
Расход защитного аргона, л/мин	12

Начальное зажигание сжатой дуги обеспечивалось без подключения сопла к источнику питания, то есть без дежурной дуги. Это является важным отличием установок с высокочастотным поджигом дуги. При минимальной дистанции между соплом и деталью начинается высокочастотный пробой. На изображении дуги, сфотографированной через сварочный светофильтр

светится не только столб дуги, выходящий из сопла, но и небольшая область в стороне между соплом и деталью. Возможно, что высокочастотный разряд проходит таким образом через сопло в виде своеобразного каскадного разряда, похожего на каскадную дугу в плазмотронах. Столб дуги по всей длине имеет яркий светлый цвет, а у детали наблюдается ореол зеленоватого цвета. Столб дуги пульсирует с существенным изменением его диаметра, при этом его форма сохраняется конической. При удлинении дуги на указанном режиме наблюдалась некоторая асимметричность, т.е. отклонение столба дуги в одну сторону. Одна сторона столба имеет наклон в виде конуса, а другая перпендикулярна детали. Это, по-видимому, объясняется некоторой асимметрией формирования потока плазмообразующего аргона в плазмотроне. При ускоренной видеосъемке со скоростью 120 к/с на детали можно заметить яркие вспышки на периферии. При увеличении длины дуги эти вспышки усиливаются и учащаются. Возможно, они связаны с катодным разрушением окисной пленки алюминия. При определенной длине дуги начинаются перерывы в ее горении. По-видимому, в период пауз сварочная дуга гаснет и горит только в период импульсов. Такой режим становится возможен за счет использования мощного высокочастотного возбудителя дуг. Это похоже на наличие межэлектродной дуги в трехфазной дуге. При дальнейшем удлинении дуги перерывы учащаются и, наконец, сварочная дуга обрывается полностью. При этом высокочастотный возбудитель продолжает действовать, о чем свидетельствует характерный треск. Перед погасанием дуги на изделии виден яркий свет активного пятна дуги.

Определение разрывной длины дуги производили на деталях из нескольких различных сплавов. При включении сжатой дуги плазмотрон поднимался до полного отключения плазменной горелки. Результаты исследования приведены на диаграмме (рис. 41).

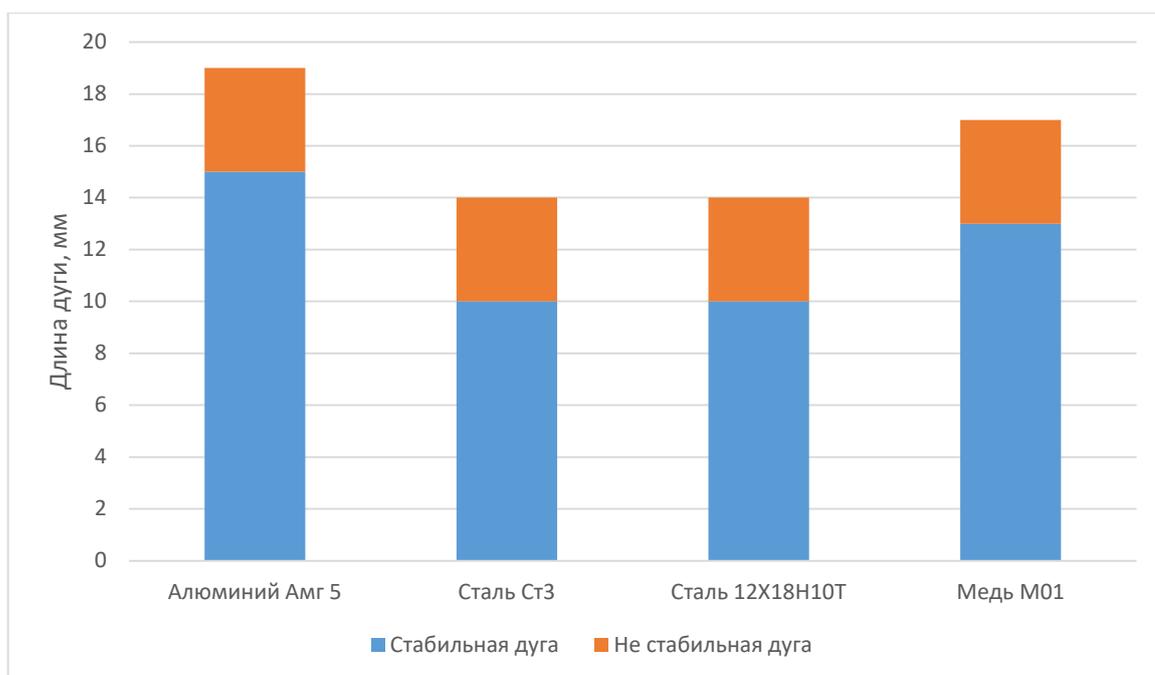


Рисунок 45– Диаграмма максимальных длин открытого участка

Длина открытого участка столба дуги на сплаве АМг5 оказалась достаточно большой для ее горения в режиме импульса – 15 мм. Общая длина дуги вместе с длиной на закрытом участке 20 мм. Затем на длине 5 мм наблюдается нестабильный режим горения. При такой длине промежутка, по-видимому, сварочная дуга перестает гореть или очень нестабильна во время пауз тока. Для обычной низкоуглеродистой стали и высоколегированной стали разрывная длина дуги оказалась одинаковой и на 5 мм меньше, чем для сплава АМг5. Разрывная длина дуги на меди занимает промежуточное положение между алюминиевым сплавом и сталями. Данный результат не полностью совпадает с результатами определения напряжений зажигания сжатой трехфазной дуги при ее движении на деталях из различных металлов [70]. Можно отметить, что возможно разрывная длина дуги связана с температурой плавления материала деталей. Чем ниже температура плавления, тем выше получилась разрывная длина дуги.



Рисунок 46 – Столб сжатой дуги перед обрывом во время паузы

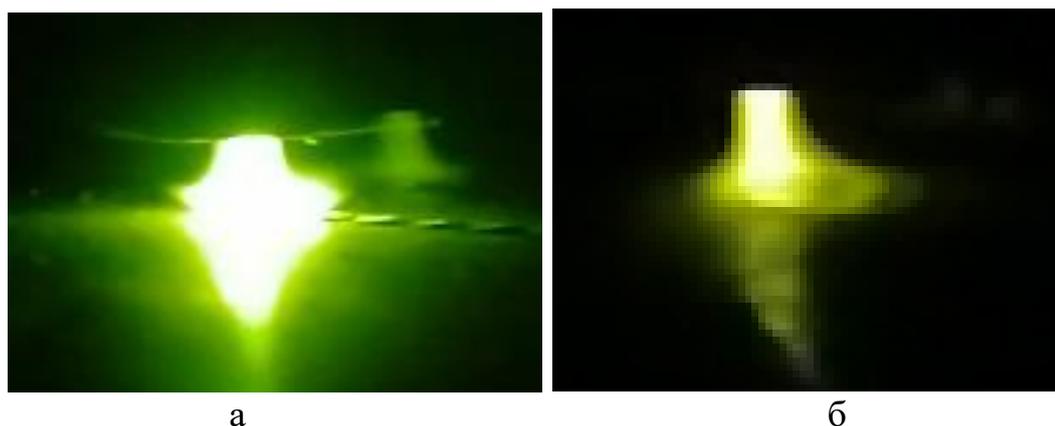


Рисунок 47– Фотографии сжатой дуги (а-во время импульса, б-во время паузы)

### **3.3 Зависимость напряжения дуги от длины ее открытого участка дуги**

Опыты проводили с помощью плазмотрона ПДРС1. Напряжение измеряли по вольтметру на источнике питания. Полученные данные записывались в памяти компьютера установки. При испытании по зависимости напряжения от длины открытого участка дуги, начальный дуговой промежуток составил  $L_0=2\text{мм}$ , измерения напряжения проводили

через  $\Delta L_0 = 1$  мм. При начале горения дуги плазмотрон поднимался плавно, при достижении дугового промежутка в 10мм сжатая сварочная дуга стала гореть нестабильно (при токе импульса в 80А дуга загоралась, а при снижении тока импульса до 40А дуга гасла).

По результату испытания был построен график (рис.48)

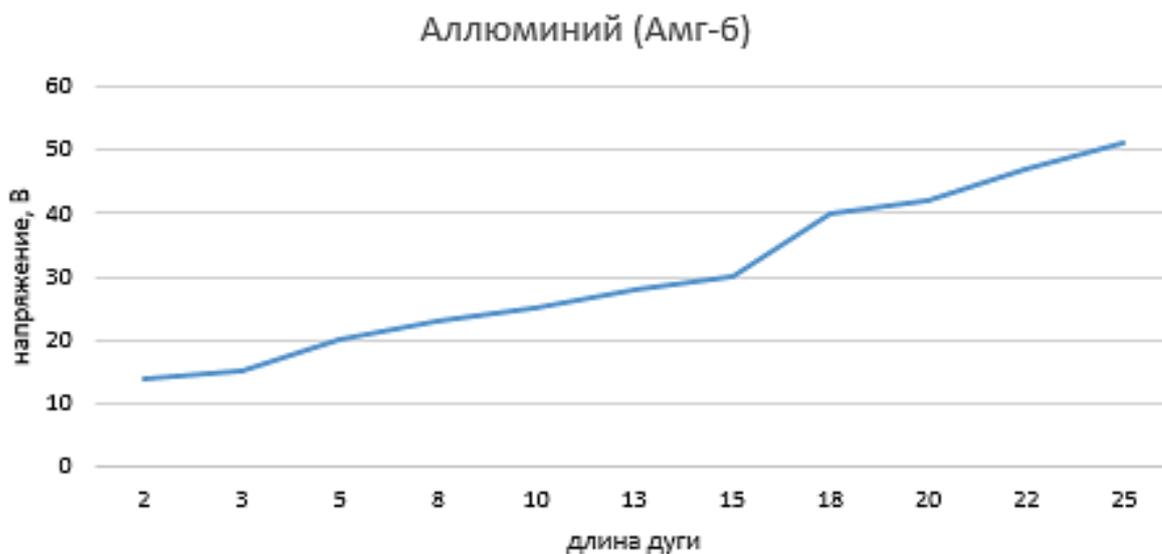


Рисунок 48– Зависимость напряжения дуги от длины открытого участка, мм

Приращение видимого дугового промежутка до дистанции  $L_0=9$  мм, после которого имеет место нестабильность ее горения, составляет около 20 В. Тогда среднюю напряженность в столбе дуги на открытом участке можно оценить в  $E_C=20/7 \approx 2,7$  В/мм. Это намного выше напряженности в столбе свободной дуги, которая оценивается в 1 В/мм [8]. По средней напряженности дуги на свободном участке, учитывая ее конусную форму, можно определить коэффициенты математической модели сжатой дуги и вести расчет таких ее параметров, как давление, эффективная мощность, аварийные режимы [54,59,71].

### 3.4 Исследование свойств сварного шва

Для проведения испытаний по сварке алюминия были взяты пластины из сплава АМГ-5 толщиной 2 мм.

При сварке был выбран тот же режим что и при проведении испытаний по влиянию длины дуги на ширину зоны катодного распыления и ширину шва. При этом был выбран плазмотрон ПРДС-2 с лучшей защитой зоны сварки.

Сборка производилась в стык без разделки кромок (тип С2 по ГОСТ 14608) [11] на стальной гладкой подкладке. Параметры процесса приведены в табл. 8 и на рис.49.

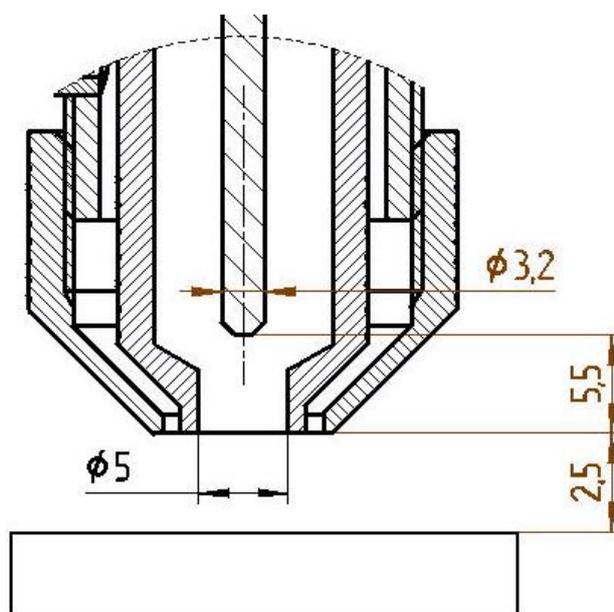


Рисунок 49 – Схема опытов и размеры плазмотрона

Таблица 8 – Параметры процесса сварки образцов

Параметры	Значения
Режим сварки	импульсный
Сварочный ток ( $I_{св}$ )	50 А
Базовый ток	25 А
Частота импульса	1 Гц
Рабочий цикл импульса	50%
Род тока	переменный
Скорость сварки	0,3 см/с
Расход плазмообразующего аргона	1,8л/мин
Расход защитного газа	10 л/мин
Толщина платины	2мм



Рисунок 50 – Внешний вид шва после наплавки пульсирующей сжатой дугой

При проведении эксперимента по плазменной сварке произошло двойное дугообразование как показано фотографии осциллограмм на мониторе компьютера установки на рис. 51. Одна сварочная дуга горела между электродом и соплом, а вторая между соплом и изделием. При этом импульсная сварочная дуга была только между электродом и соплом, о чем свидетельствует осциллограмма на рис 51. Аварийный режим длился 3,2секунды.

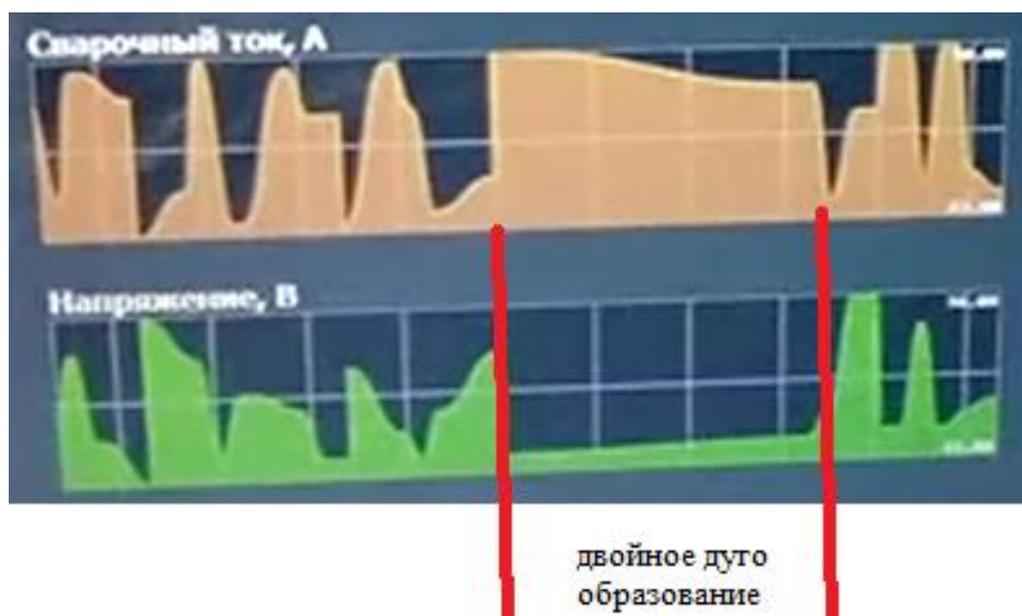


Рисунок 51– Фото осциллограмм тока и напряжения дуги с монитора сварочной установки

Возникновение двойной дуги объясняется следующим. Из-за перегрева изолятора (изготовленного из фторопласта) который расположен в плазматроне, сопло начало смещаться относительно центра электрода, уменьшая промежуток между электродом и соплом. Тем самым вызвав аварийного режима работы плазматрона с образованием двойной дуги. Это указывает на то, что для изготовления изолятора необходимо использовать более термостойкий материал.

Испытание на разрыв сварных образцов производилось на испытательной машине РМ-200 с использованием специального приспособления (рис.52) по ГОСТ 6696-66 [14]. Вид разрушенного образца показан на рис. 53.

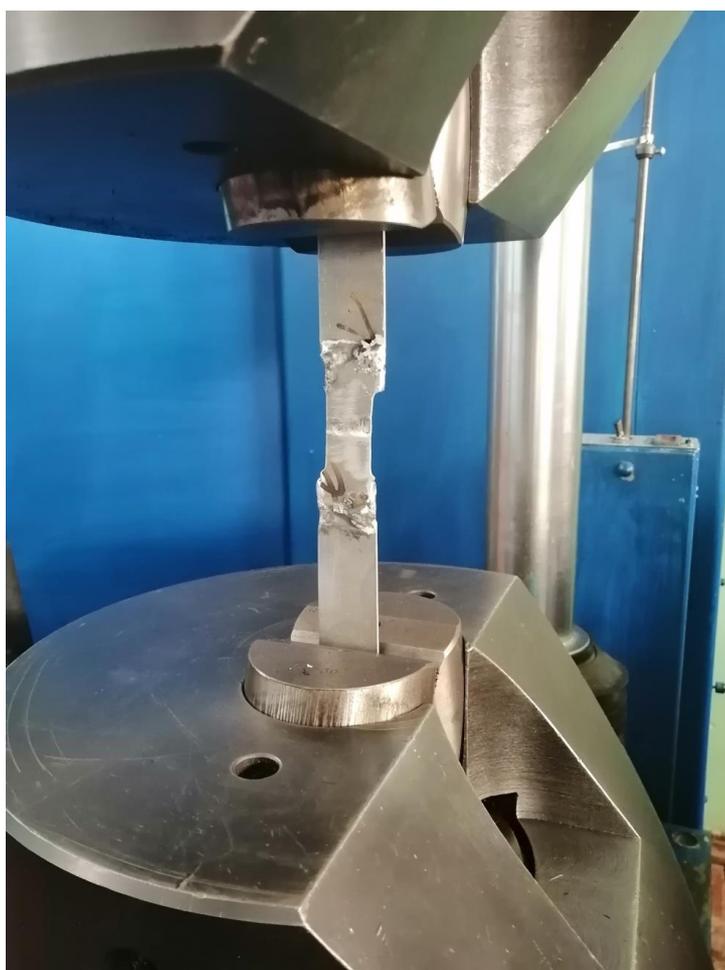


Рисунок 52 – Сварной образец в захватах испытательной машины



Рисунок 53– Внешний вид образца после разрыва



Рисунок 54 –Внешний вид излома образца

При рассмотрении характера разрушения сварного соединения можно понять, что произошел вязкий излом. Форма разрыва имеет бугристый рельеф с выступлениями, которые свидетельствует о значительной пластической деформации перед разрушением.

Предел прочности на растяжение сваренных образцов составляет 204 МПа а предел прочности основного материала составляет 312 МПа. В связи с этим можно судить, что сварное соединение менее прочное, чем основной материал. В работе [73] приводятся данные, что для сплава АМг-6 при сварке плавящимся электродом в аргоне достигается прочность сварного соединения 295 МПа. Поэтому требуется дальнейшая отработка режимов сварки для повышения прочности сварного соединения.

## **4 Исследование тепловых характеристик сжатой пульсирующей дуги переменного тока**

### **4.1 Определение приведенных характеристик источника тепла для условий пульсирующей дуги переменного тока**

В работе [57] показано, что определение эффективной мощности источника тепла с помощью эффективного КПД или ее прямого калориметрирования не позволяет с необходимой для инженерной практики точностью рассчитывать размеры сварного шва и температуры других зон при сварке. Это справедливо для теории сварочных источников тепла, разработанной Н.Н. Рыкалиным и которая широко применяется в отечественной практике, если использовать рекомендуемые значения теплофизических коэффициентов. К таким коэффициентам в формуле (5) относятся объемная теплоемкость и коэффициент температуропроводности  $a$ .

Сложные математические методы расчета размеров шва с учетом свойств дуги и сварочной ванны, использующие мощные математические программные продукты еще не скоро начнут использоваться напрямую в инженерной практике. Каждый из этих пакетов требует высокого уровня знаний, как в области вычислений, так и в специальных вопросах сварки. Любая ошибка в выборе исходных данных, начальных и граничных условий может привести к ошибкам и иметь серьезные негативные последствия. Наиболее перспективным представляется путь комбинации этих двух подходов.

Основной проблемой в использовании математических пакетов является многообразие условий сварки, для учета которых в каждом конкретном случае необходимо проведение большого объема экспериментов. В любом случае использование пакетов также может производиться только с опорой на эксперимент.

Предлагаемый подход, который основан на классических формулах распространения тепла при сварке можно назвать методом приведения параметров математической модели (МПММ) к экспериментальным данным. МПММ начал применяться достаточно давно. Н.Н. Прохоров использовал коэффициенты аффинного преобразования [43], когда отыскивал теплофизические коэффициенты линейных моделей по размерам сварочной ванны.

Поскольку основой сварки пульсирующей дугой является фактически точечная сварка, то предлагается параметры математической модели определять по размерам сварных точек. При этом нет необходимости измерения температур материала, что позволяет использовать такой подход и в условиях производственных лабораторий.

Схему расчета при сварке пульсирующей дугой можно составить с использованием метода сложения температурных полей от действия двух источников тепла разной мощности. Первый положительный источник постоянной мощности действует постоянно и для описания температур от него подходит формула (5). Второй источник тепла отрицательной мощности (сток теплоты) действует импульсами такой мощности, чтобы разность импульсов положительной мощности и отрицательной мощности была равна положительной мощности источника в период пауз. Тогда можно найти установившееся состояние температурного поля от источника постоянной мощности и приложить с некоторого момента несколько импульсов (2-3 импульса) с отрицательной мощностью. Эти отрицательные импульсы мощности, должны изменить картину температурного поля и сделать ее близкой к реальному процессу сварки пульсирующей дугой.

Для реализации этого подхода необходимо определить характеристики положительного и отрицательного источника тепла. Сделать это можно, изучив развитие точек на пластинах на токах импульсов и пауз во времени.

Для этого используем формулу (5) следующим образом. Представим формулу (5) в обобщенном виде

$$\Delta T = K_1 f(x, y, z, a, \delta, t), \quad (16)$$

где  $K_1$  – коэффициент пропорциональности в (5). Тогда для двух точек с разными координатами  $x, y, z$  и имеющих температуру плавления в момент времени  $t$ , можно записать

$$\Delta T_1 / \Delta T_2 = f_1(x_1, y_1, z_1, a, \delta, t) / f_2(x_2, y_2, z_2, a, \delta, t) = 1. \quad (17)$$

Для таких двух точек отношение (17) должно быть равно 1. В выражении (17) неизвестным является один коэффициент температуропроводности  $a$ . То есть задача заключается в том, чтобы наплавленной точки подобрать такой коэффициент  $a$ , чтобы отношение (17) для двух ее размеров было как можно ближе к 1.

В случае двухсторонней сварки лучше определять коэффициент  $a$  при неполном проплавлении пластин, а при односторонней сварке – при полном проплавлении. При этом условия теплоотвода от пластины следует оставлять аналогичными проектируемому процессу сварки. Т. о., для двухсторонней сварки при наплавке одной точки необходимо изготавливать шлиф сварной точки и определять по нему кроме наружного диаметра глубину проплавления. Для более точного определения коэффициента  $a$  необходимо наплавлять не одну, а несколько точек с различным временем наплавки. Затем для каждого найденного коэффициента  $a$  рассчитывается коэффициент пропорциональности по формуле (16). После расчета всех  $K_1$  необходимо усреднить их значения. То же самое следует сделать с коэффициентами  $a$ . После этого можно решать обратную задачу – с помощью формулы (5) определять расчетные размеры наплавленных точек и сравнивать их с опытными значениями. Для этого необходимо рассчитать относительное отклонение расчетного значения от опытного для каждого размера и рассчитать среднее алгебраическое отклонение (САО) всех значений [22]. При вычислении САО берутся относительные отклонения по абсолютной величине. САО является аналогом среднего квадратичного отклонения, но вычисляется намного проще.

Поскольку исследуется импульсный процесс, в котором токи импульса и паузы существенно отличаются, необходимо определение коэффициентов  $a$  и  $K_1$  во всем диапазоне возможных токов.

#### **4.2 Исследование влияния параметров модели на размеры точки**

Для обоснованного выбора параметров экспериментов предварительно теоретически исследовали зависимости проплавления алюминиевых пластин. Исследование выполняли с помощью компьютерной программы «BSHWA» на языке Бейсик, разработанной на кафедре СОМД и РП ТГУ [53]. В этой программе постоянную времени источника тепла  $t_0$ , характеризующую сосредоточенность источника тепла принимали  $t_0 = 0$ , что превращает нормально-круговой источник в точечный. За базовое значение коэффициента температуропроводности принимали для алюминиевых сплавов  $a = 0,85 \text{ см}^2/\text{с}$ , а объемную теплоемкость  $c_p = 2,7 \text{ Дж}/(\text{см}^3\text{°C})$  [18]. Температуру плавления принимали  $660 \text{ °C}$ , начальную температуру деталей  $20 \text{ °C}$ . Расчеты выполняли для толщин 2 и 3 мм. Изучали зависимости диаметра и провара точки в зависимости от времени действия дуги при изменении мощности источника тепла и коэффициента  $a$ . Полученные зависимости при толщине пластины 2 мм и мощности источника тепла 600 Вт приведены в табл. 9.

Таблица 9– Влияние времени сварки на глубину проплавления точки

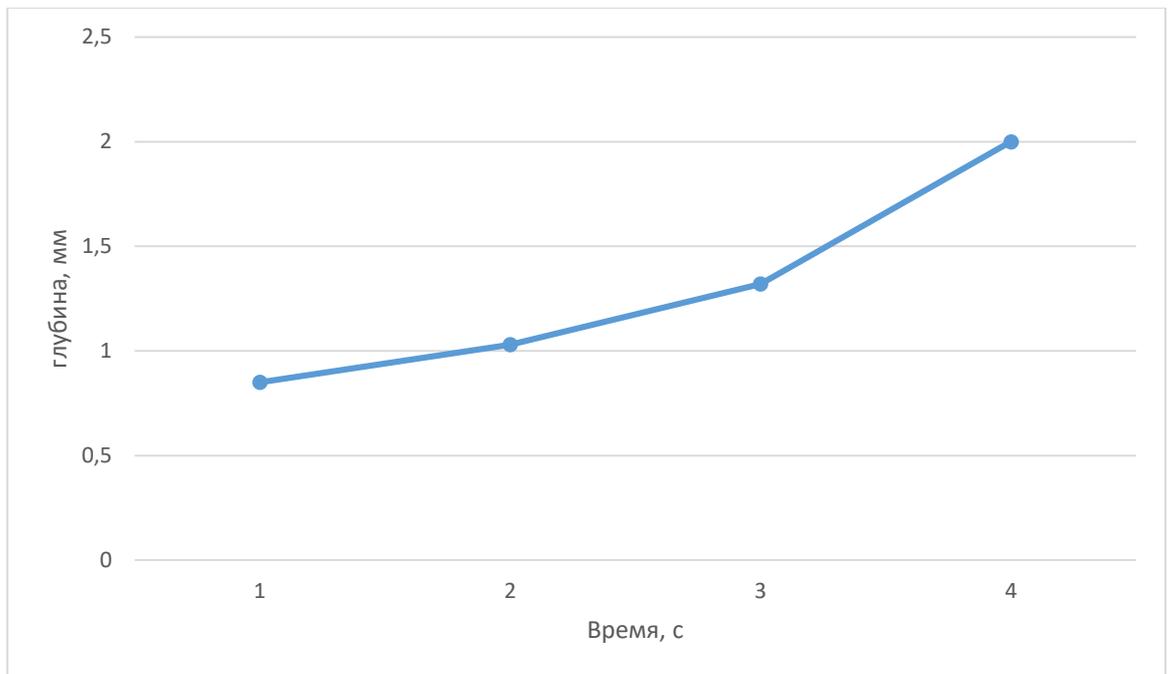


Рисунок 55 Зависимость глубины проплавления от времени действия источника. Толщина пластины 2 мм, мощность источника 600 Вт.

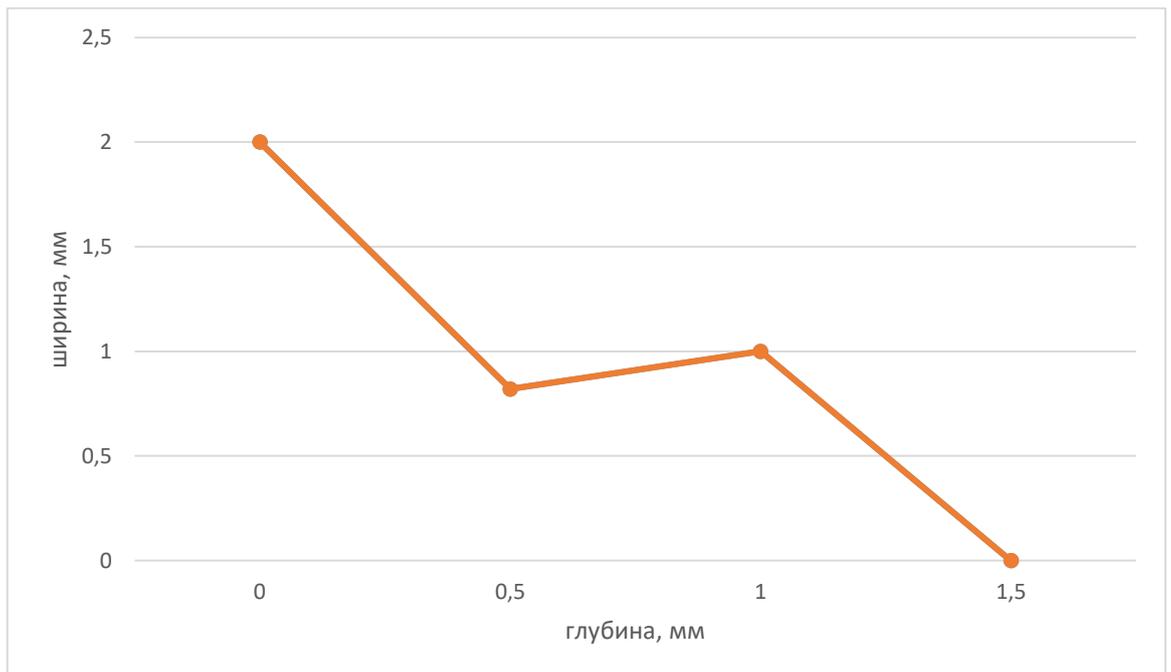


Рисунок 56 Профиль проваров точки. Толщина пластины 2 мм, мощность источника 600 Вт. Время  $t = 4$  с.

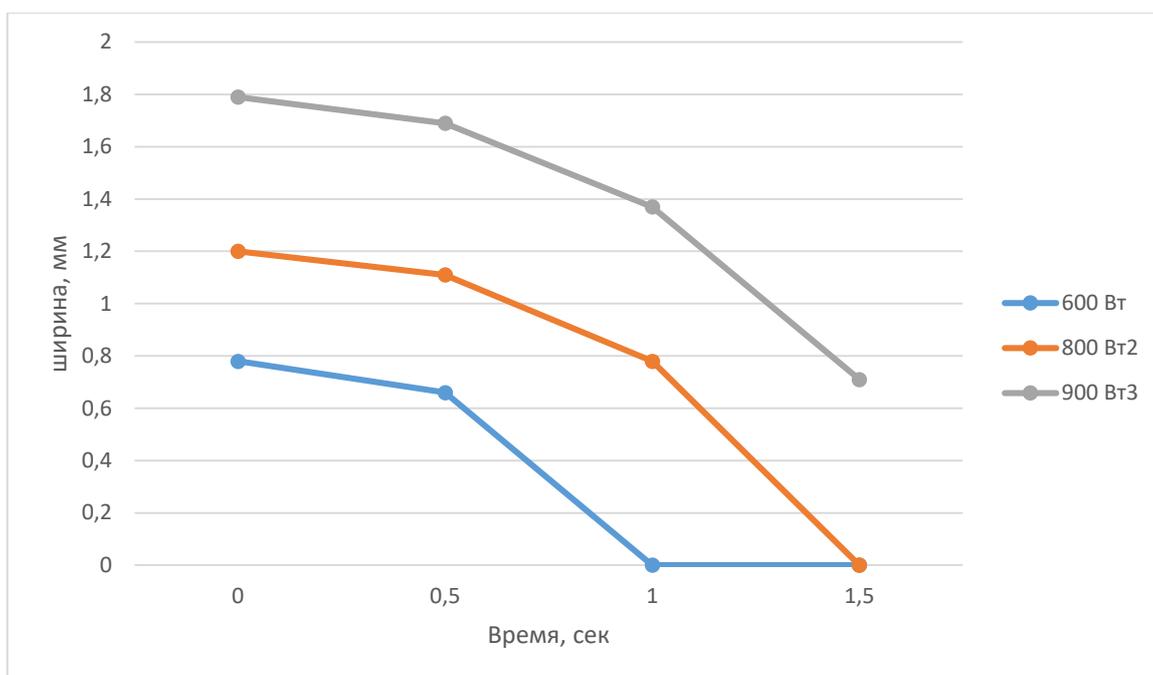


Рисунок 57 - Профиль проваров точки. Толщина пластины 3 мм.

#### 4.3 Определение коэффициентов $\alpha$ и $K1$ на основе наплавки точек

Для определения коэффициента пропорциональности математической модели в формуле (1.5) были проведены эксперименты по наплавке точек на пластину из алюминиевого сплава толщиной 2 мм. Время наплавки фиксировалось по показаниям компьютера на источнике питания с точностью до 0,1 секунды. В процессе наплавки изменялось время сварки, а ток оставался неизменным. Всего было выполнено две серии опытов на токах 25 и 50 А.



Рисунок 58 Наплавка точек на алюминиевые пластины

Опытные и расчетные значения приведены в табл.2. На первом этапе коэффициент температуропроводности принимался по рекомендациям  $\alpha=0,85$  см<sup>2</sup>/с. В формулу подставлялись время наплавки и радиус точки и определялось значение не коэффициента  $K_1$ , при котором температура равна температуре плавления сплава 660 °С, а удельной эффективной мощности на 1 А тока дуги. Начальную температуру деталей принимали  $T_0=20$  °С.

Таблица 9 Параметры опытов по наплавке точек сжатой дугой

Параметр	Значение
Род тока	переменный
Расход плазмообразующего газа	2,5 л/мин
Расход защитного газа	10 л/мин
Длина открытого участка	2мм
Длина закрытого участка	5мм
Общая длина дуги	7 мм
Диаметр электрода,	3,2мм
Марка электрода	WL-20
Диаметр сопла	5мм
Толщина пластин	2 мм

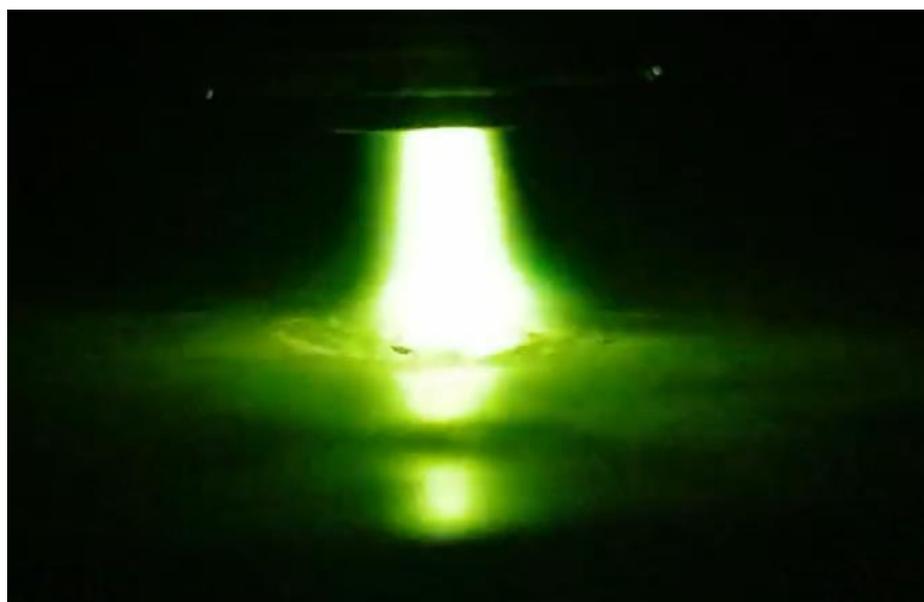


Рисунок 5 Фотография открытого участка столба сжатой дуги через светофильтр при наплавке точек

Таблица 2 Результаты измерения и расчетов диаметров точек сжатой дугой

№ опыта	Ток, А	Время наплавки, с	Диаметр лицевой D, мм	$q_1$ , Вт/А	$\Delta$ , %	САО, %	$q_{1cp}$ , Вт/А
1	50	1,2	2,2	13,6	3,6	2,0	13,1
2	50	1,7	2,3	13,0	-0,9		
3	50	3,2	2,8	12,8	-2,5		
5	25	3,6	1,4	15,8	-10,7	7,3	17,7
6	25	6,2	1,8	18,2	+2,8		
7	25	7,9	2	19,2	+8,5		
8	75	1,7	7,2	15,2	+13,4	9,2	13,4
9	75	3,7	8	13,0	-3,0		
10	75	7,3	9,5	11,9	-11,2		
11	100	2,2	9,8	12,8	-5,3	5,3	12,15
12	100	3,9	11	11,5	+5,3		

После этого рассчитывали среднее значение коэффициента  $q_1$  по данным каждой серии опытов, а также среднее алгебраическое отклонение (САО) всех данных серии от этого среднего значения. Полученные значения удельной эффективной мощности весьма значительны, близки к значениям, полученным для дуги прямой полярности при сварке плавящимся электродом. В работе приводят данные, что удельная эффективная мощность для

свободной дуги переменного тока около 8 Вт/А. Даже если не учитывать высокого значения при токе 25 А, то в данном случае полученные значения примерно в 1,5 раза больше, чем в свободной однофазной дуге переменного тока. Это можно объяснить тем, что в сжатой дуге значительную мощность к изделию переносится потоком плазмообразующего газа. Наименьшие значения САО получены для тока 50 А, а наибольшие для 75А. Это можно объяснить тем, что определение коэффициентов для каждого тока следует производить с учетом толщины. Чем больше ток, тем больше должна быть толщина пластины. Однако значения САО вполне удовлетворительные. САО можно было бы снизить, если использовать два размера сварной точки. Малые токи имеют преимущество в том, что на них выше удельная эффективная мощность на 1А тока дуги. Это нужно учитывать при выборе режимов сварки пульсирующей дугой. Так по данным табл. эффективная мощность дуги на токе 25А составит  $25 \cdot 17,7 = 443$  Вт, а на 50 А  $50 \cdot 13,1 = 655$  Вт, то есть разница мощностей не столь велика, как изменение тока дуги.

При рассмотрении данных табл. следует учитывать, что в ней, по-видимому, приводятся действующие значения переменного тока. Для сравнения же тепловой эффективности по сравнению с дугами постоянного тока необходимо использовать среднее значение переменного синусоидального тока за период, которое в 0,91 раза меньше действующего значения. Тогда полученные значения  $q_1$  необходимо разделить еще и на 0,91.

Также для сравнения тепловой эффективности сжатой и свободной дуг переменного тока были выполнены аналогичные эксперименты на свободной дуге ( табл. )

Таблица 3 Условия наплавки точек свободной дугой

Параметр	Значение
Род тока	переменный
Расход защитного газа	10 л/мин
Общая длина дуги	5,5 мм
Диаметр электрода,	3,2мм
Марка электрода	WL-20
Диаметр сопла	16мм

Таблица 4 Результаты измерения и расчетов диаметров точек свободной дугой

№ опыта	Ток, А	Время наплавки, с	Диаметр лицевой D, мм	$q_1$ , Вт/А	$\Delta$ , %	CAO, %	$q_{1cp}$ , Вт/А
1	25	3,2	1,0	11,92	-5,1	-5,1	12,56
3	25	7,9	3,0	13,2	+5,1		
4	50	3,2	3,0	13,0	-4,6	3,0	13,63
5	50	5,9	5,0	14,0	+2,7		
6	50	7,0	5,3	13,9	+1,7		
7	75	3,5	6,7	12,0	-6,1	4,07	12,78
8	75	6,0	10,0	12,87	+0,7		
9	75	7,9	12,5	13,47	+5,4		
10	100	4,4	12,5	11,95	+3,7	2,5	11,52
11	100	6,6	14,0	11,33	-1,6		
12	100	7,7	15,0	11,27	-2,2		

Рассматривая данные табл. можно заметить, что в целом значения удельной эффективной мощности  $q_1$  у сжатой и свободной дуги не сильно отличаются. В диапазоне токов 50-100А заметна тенденция к снижению удельной эффективной мощности с увеличением тока, что можно объяснить известным уменьшением катодного падения напряжения с ростом тока. Разброс расчетных значений в этом токовом диапазоне достаточно мал и составляет в среднем 3%. Это позволяет с высокой точностью рассчитывать размеры шва и режимы сварки при сварке стационарной дугой. Точность определения удельной эффективной мощности на токе 25А ниже. Учитывая, что ток паузы оказывает значительно меньшее влияние на нагрев изделия, полученной точности удельной эффективной мощности вполне достаточно для инженерных расчетов.

#### 4.4 Алгоритм расчета температур в пластине при сварке пульсирующей дугой

Для расчета температур в пластине при действии пульсирующей дуги можно применить метод суперпозиций для формулы (5), то есть их наложения от нескольких источников тепла. Можно воспользоваться искусственным

приемом, изложенным в курсе теории сварочных процессов [72]. Температуру после окончания действия реального источника тепла можно рассчитать, если продолжить его действие дальше, а с момента окончания действия ввести сток теплоты. Такой прием был использован в работе [60] для определения постоянной времени сварочной ванны. В данном случае отличие заключается в том, что действие дуги во время импульса можно принять в качестве положительного непрерывно действующего источника тепла, а действие пауз смоделировать введением комбинации непрерывно действующих стоков теплоты и источников тепла величиной равной мощности пауз. На рис. представлена такая схема для действия одного импульса. Время действия источника импульсов до достижения равновесного состояния обозначим  $t_1$ , время действия стока теплоты этого же источника будет  $t - t_1$ . В момент времени  $t_1 - t_{II}$  начинает действовать сток теплоты, имитирующий паузу. По ее окончании начинает действовать источник теплоты с мощностью паузы. Число источников, имитирующих действие паузу выбирается таким, чтобы изменение температуры в характерных точках стало пренебрежимо малым.

В связи с тем, что в предыдущем разделе установлено, что плазменная струя передает детали значительную мощность, произведем оценку его роли.

Диаметр сопла 5 мм, длина сопла 5 мм и расход плазмообразующего аргона 2, 5 л/мин, что составляет 0,0742 г/с. Воспользуемся формулами в разделе 1 и программой, которая приведена в сборнике лабораторных работ. Полученные расчетные данные сведены в табл.16.

Таблица 16 –Расчетные данные энергетических характеристик столба в канале сопла

I, А	U <sub>с</sub> , В	P <sub>с</sub> , Вт	Q <sub>с</sub> , Вт	Q <sub>г</sub> ,Вт	Δс, мм	E <sub>ПР</sub> , В/мм	Н <sub>г</sub> , Дж/г
25	6,74	169	129	40	0,57	119	539
50	8,5	425	218	207	0,21	407	2789
75	9,73	729	324	405	0,12	815	5458
100	10,71	1071	442	629	0,08	1327	8477

Средняя напряженность электрического поля в столбе дуги на закрытом участке изменяется с 1,35 В/мм на токе 25 А до 2,14 В/мм при токе 100 А. Напряженность поля в свободной дуге оценивается в 1,0 В/мм [9]. При увеличении тока в 4 раза, мощность, поглощаемая плазмообразующим аргоном возросла почти в 16 раз. При токе 25 А газ почти не вкладывает тепла в изделие, при токе 100 А такой вклад уже существенен. Средняя толщина изолирующей прослойки  $\Delta_c$  уменьшилась в 8 раз с увеличением тока, а вероятность возникновения аварийного режима, который характеризуется отношением падения напряжения в канале сопла к средней толщине прослойки возросла в 11 раз. Данные таблицы 1 показывают, что ток дуги при данных параметрах сопла может быть значительно увеличен, и соответственно увеличен вклад плазмообразующего аргона в эффективную мощность дуги.

Представляет интерес оценить вклад плазмообразующего аргона в удельную эффективную мощность с учетом данных полученных по результатам наплавки точек из табл. 13. Для этого из удельной эффективной мощности полученной в табл. 13 вычитали удельную эффективную мощность плазмообразующего аргона из табл.16 Результаты приведены в табл.17.

Таблица 17 –Структура эффективной мощности сжатой дуги

Ток, А	25	50	75	100
Полная удельная мощность	17,7	13,1	13,4	12,15
Удельная мощность газа	1,6	4,14	5,4	6,29
Мощность приэлектродных областей	16,1	8,96	8,0	5,86

В соответствии с данными табл. 17 удельная эффективная мощность свободной дуги существенно снижается с ростом тока. При использовании сжатой дуги это приводит к выравниванию значений удельной эффективной мощности на разных токах. При больших токах свыше 100 А роль плазмообразующего аргона в нагреве изделия порядка 50% общей мощности.

## Выводы

1. Разработаны и испытаны две конструкции плазмотронов с различными системами подачи защитного и плазмообразующего газа, что позволяет проводить исследования роли конструктивных особенностей на защиту сварочной ванны от воздуха, формирование столба дуги, разрушение окисной пленки алюминия и энергетические характеристики столба.

2. Впервые проведено испытание формирования сжатой однофазной дуги переменного синусоидального тока, работающей в пульсирующем режиме и показана ее высокая устойчивость в большом диапазоне длин дуги при токе импульса 25 А и токе паузы 50 А. При этом не используется сопло плазмотрона для формирования дежурной дуги.

3. Для плазмотрона с совместной подачей защитного и плазмообразующего аргона проведены исследования ширины зоны катодного разрушения окисной пленки в зависимости от длины дуги.

4. Для плазмотрона с отдельной подачей защитного и плазмообразующего аргона проведено исследование разрывной длины сжатой дуги на различных материалах. Установлено, что на алюминиевом сплаве имеет место максимальная разрывная длина дуги. При определенной длине дуги благодаря действию высокочастотного возбудителя наблюдается гашение дуги во время импульса малого тока и горение во время импульса большого тока.

5. Получена зависимость напряжения дуги от длины ее открытого участка, позволяющая определить напряженность электрического поля на этом участке, что может позволить определить коэффициенты математической модели энергетических характеристик сжатой дуги.

6. Произведена наплавка точек на нескольких токах свободной и сжатой дуги с изменением времени наплавки, позволившая рассчитать значения удельной эффективной мощности сжатой дуги при использовании математической модели точечного источника тепла на плоской поверхности

плоского слоя. Это позволяет выполнять расчеты тепловых процессов при сварке алюминиевых сплавов как стационарной, так и пульсирующей дугой.

7. Произведены расчеты энергетических параметров столба сжатой дуги на закрытом участке столба, позволившие оценить вклад плазмообразующего аргона в удельную эффективную мощность при изменении токов дуги.

8. Впервые получены сварные соединения при сварке стационарной и пульсирующей сжатой дугами сплава АМг-6 толщиной 2 мм и определена прочность и пластичность сварных соединений.

## Заключение

Проведенные исследования подтвердили актуальность выбранной темы и правильность поставленных задач. В процессе работы было изготовлено два опытных образца плазмотрона, с различными системами подачи защитного и плазмообразующего газов. Лучшую защиту и формирование сжатой дуги обеспечил плазмотрон с аксиальной подачей плазмообразующего аргона. Он также обеспечивает лучшую очистку алюминиевых сплавов от окисной пленки  $Al_2O_3$ . Плазмотроны способны работать практически с любым источником тока установок аргонодуговой сварки. При этом получен ряд интересных результатов. Установлено, что зажигание сжатой дуги обеспечивается источником высокочастотного разряда, несмотря на значительное увеличение дистанции между электродом и изделием. Таким образом, может не использоваться ступенчатое зажигание дуги и сопло изолировано полностью. Это может способствовать повышению стойкости плазмотрона против аварийного режима двойного дугообразования.

Также установлено, что увеличение длины дуги и продув ее плазмообразующим аргоном не являются препятствием для устойчивых повторных возбуждений дуги. Причиной этого является наличие ВЧ-разряда. В частности, получены достаточно высокие значения удельной эффективной мощности сжатой и свободной дуг переменного тока, произведена оценка вклада в эффективную мощность сжатой дуги плазмообразующего аргона. Показано, что на базовом предприятии могут быть внедрены эффективные процессы плазменной сварки от установок, которые были приобретены для сварки свободными сварочными дугами. Мощность сжатой дуги может быть повышена в несколько раз. Дальнейшие исследования следует направить на изучение процессов двойного образования в сжатой дуге переменного тока и оптимизации на базе этого режимов горения сжатой дуги. Также следует отрабатывать конкретные технологические процессы сварки сжатой дугой.

## Список используемой литературы

1. А. С. № 758638 (СССР). МКИ2 В23 К 9/16 Способ импульсной сварки трехфазной дугой / Столбов В.И., Сидоров В.П., Абросимов С.М.
2. А.с. 100898 (СССР). Способ сварки тонколистовой стали электрической дугой /М.П.Зайцев.- Оpub.в Б.И., 1966, № 7.
3. Авторское свидетельство № 603525 А1 СССР, МПК В23К 9/16. Двухэлектродная горелка для дуговой сварки неплавящимися электродами в защитных газах : № 2354627 : заявл. 28.04.1976 : опубл. 25.04.1978 / В. И. Столбов, Г. В. Осянкин, Ю. А. Малютин, Р. А. Магай ; заявитель ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ.
4. Вагнер Ф.А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой. -М.: Энергия, 1980.-120 с.
5. Вагнер Ф.А., Степанов В.В. Выбор параметров режима сварки пульсирующей дугой и их влияние на свойства сварных соединений //Сварочное производство.- 1968.- № 5.-с. 14-16.
6. Васильев К.В. Газоэлектрическая резка металлов. - М.: Машгиз, 1963.- 176 с.
7. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка. - М. :Машиностроение, 1974. - 111 с.
8. Введение в основы сварки: учебное пособие / В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов; Юргинский технологический институт – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 338 с.
9. Гедовиус Н.А., Шмаков В.М. Сварка новых материалов в среде защитных газов. Куйбышев: 1969. –112 с.
10. Гладков Э.А. Автоматизация сварочных процессов / Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский. – М.: Изд-во МГТУим. Н.Э. Баумана, 2014.- 421 с.
11. ГОСТ 14806–80. Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. М.: Изд-во стандартов. 1991 – 35 с.

12. ГОСТ 23949-80. Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. Технические условия. – М.:ДЕАН, 2004 – 8с.
13. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. - М.:ДЕАН, 2009 – 32с.
14. ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств. - М. Госстандарт – 45с.
15. Гринюк А.А. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов / А.А. Гринюк, В.Н. Коржик, В.Е. Шевченко // Автоматическая сварка. — 2015. — № №11. — С.39-50.
16. Дудко Д.А., Корниенко А.Н. Тепловая эффективность процесса сварки плазменной дугой переменного тока // Автомат. сварка. - 1967. - № 11. - С. 27-32.
17. Дудко Д.А., Корниенко А.Н. Электрические характеристики плазменной дуги переменного тока // Автомат. сварка. - 1969.- № - С. 14-20.
18. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2015 – 572 с.
19. Короткова Г.М. Источники питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов. Тольятти, ТГУ, 2009.- 335 с.
20. Кремниевые управляемые вентили-тиристоры. Технический справочник: Пер. с англ. /Под ред. В.А.Лабунцова и В.Ф.Свиридова:М.-Л. Энергия, 1974.-360 с."
21. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1988. – 233 с.
22. Малаховский В.А. Влияние параметров режима, размеров и формы сопла плазмотрона на параметры дуги // Свароч. пр-во. - 1982. - № 4. - С. 6-7.
23. Малаховский В.А., Стихин В.А. и Попков А.М. Влияние конструкции сопла плазменной горелки и параметров режима на размеры дуги// Сварочное производство. - 1976.- № 8.- с.43-45.

24. Малаховский В.А., Стихин В.А., Попков А.М. Влияние геометрии сопла на проплавляющую способность сжатой дуги //Сварочное производство.- 1973. - № 8.- с. 10-11.

25. Малаховский В.А., Стихин В.А. и Попков А.М. Электрические характеристики сжатой сварочной дуги // Сварочное производство.-1974.- № 9.- с.3-5.

26. Малин В. Е. Исследование тепловых характеристик сжатой дуги переменного тока // Свароч. пр-во. - 1969. - № 9. - С. 3-5.

27. Малин В. Е. Электрические характеристики дуги переменного тока // Автомат. сварка. - 1969. - № 7. - С. 35-39.

28. Микроплазменная сварка / В.Е.Патон, В.С.Гроздецкий. Д.А.Дудко и др.-Киев: Наукова думка, 1979-248 с.

29. Микроплазменная сварка / В.Е.Патон, В.С.Гроздецкий. Д.А.Дудко и др.-Киев: Наукова думка, 1979-248 с.

30. Михайлов Г. П. Технология сварки трехфазной дугой. М. : Машгиз, 1952.

31. Мордвинцев Л.А., Бовин Г. П., Фетисов Г.П. и др./ Эффективность плазменной сварки переменным током алюминиевых сплавов. Свароч. пр-во. - Ионин В.Е. Методика расчёта параметров импульсной сжатой дуги // Свароч. пр-во. - 1970. - № 6. - С. 2-3.

32. Ников Н. Я., Хмелевская В. Б. Исследование влияния параметров геометрии сопла и параметров режима на эффективную тепловую мощность и эффективный К.П.Д. дуги // Труды Ленинградского кораблестроительного института, вып. 79 Л.: ЛИВТ 1972. - С. 89-94.

33. Николаев А.В. О каскадной дуге в плазменных установках //Автоматическая сварка.- 1971.- № 6. -С. 5-7.

34. Оборудование для дуговой сварки : Справочное пособие / Под ред. В.В. Смирнова. Л.: Энергоатомиздат, 1986.- 656 с.

35. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. - М.: Машиностроение, 1966. - 359 с.

36. Пацкевич И.Р., Стихин В.А. Исследование электрических характеристик сжатой дуги при сварке //Технология и оборудование сварочных процессов. - Пермь: Политехн.ин-т, 1970. - С. 59-66 (Сб. научн. тр.- № 76).

37. Пашкин А.Н. Развитие и перспективы применения трехфазной сварки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. №13.

38. Петров А.В., Акулов А.И., Гладков Э.А. и др. Выбор сигнала обратной связи для автоматизации процесса плазменной сварки // Сварочное производство.- 1977.- № 12.- С.35-37.

39. Петров А.В., Славин Г.А. Автоматическая сварка тонколистовой стали импульсной дугой // Сварочное производство.-1962. № 28-с. 18-21.

40. Петров А.В., Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной дуги // Сварочное производство.-1966.-№ 2.-С.1-4.

41. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров, В.Д. Веселков и др. - М.: Машиностроение, 1969. - 192 с.

42. Прохоров Н.Никол. Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. М.: Металлургия, 1979. – 248 с.

43. Рубинчик Ю.Л. Механизированная сварка корпусных конструкций из алюминиевых сплавов. Л.: Судостроение, 1974.- 136 с.

44. Рыкалин Н.Н., Николаев А.В., Асонов А.Н. Электрические и энергетические характеристики плазменной дуги при модуляции тока // Автомат. сварка. - 1975. - № 11. - С. 1-5.

45. Савинов А.В. Дуговая сварка неплавящимся электродом / А.В. Савинов, И.Е. Лапин, В.И. Лысак.- М.: Машиностроение, 2011.- 477 с.

46. Сварка в машиностроении : Справочник в 4-х т. М.: Машиностроение, 1978– Т.1/ Под ред. Н.А. Ольшанского.1978. 504 с.

47. Сварка. Резка. Контроль : справочник. В 2 т. / Н.П. Алешин [ и др. ] ; под общ. Ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова.- М.: Машиностроение, 2004.- Т.1. -624 с.

48. Сварочный аппарат инверторного типа, модели MagicWave 5000 Job AC/DC. Руководство по эксплуатации 42.0426.0063.RU 2021г. -228с.

49. Сварочный стол welding table tvn spec. Руководство по эксплуатации 42,0416,0163 RU 2010г. -23с.

50. Сварочный трактор модели FDV 22 MF. Руководство по эксплуатации 42,0426,0173 RU 2015г. -123с.

51. Сидоров В.П. Исследование и разработка процесса плазменной резки алюминия трёхфазной дугой. Дис. ... канд. техн. наук. - Тольятти, 1980. - 198 с.

52. Сидоров В.П. Математическое моделирование энергетических процессов сварки. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2014. –193 с.

53. Сидоров В.П. Методика расчёта параметров, характеризующих возникновение аварийного режима работы плазмотрона / Сварочное производство. – 1984. – № 7. –С.4–6.

54. Сидоров В.П. О понятии гибкости технологического процесса сварки/ Материалы конференции сварщиков Урала. Челябинск. 2000 г. –С. 106–108.

55. Сидоров В.П. Приближённая двумерная модель дуги в канале плазмотрона. Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 3. –С.10-11.

56. Сидоров В.П. Расчёты параметров сварки плавлением. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. – 286 с.

57. Сидоров В.П., Абросимов С.М. Способ обработки плазменной импульсной дугой. А. С. № 1683927 (СССР). МКИ2 В 23К 10/00 – Оpubл. 15.10.91, Бюл. № 38.

58. Сидоров В.П., Печенкина В.А. Расчёт среднего газокинетического давления плазмообразующего газа / Тез. докл. 16 научн. техн. конф. сварщиков Урала "Прогрессивная технология, механизация и автоматизация сварочного производства". Свердловск, 11-14 марта 1986 г. – С.32.

59. Сидоров В.П., Семистенов Д.А. Методика исследования переходных процессов проплавления металла при действии возмущений Сб. докладов

Всероссийской с международным участием НТК, посвященной 150-летию со дня рождения Н.Г. Славянова. 17-20 мая 2004 г. Пермь: ПГТУ. –Т. 2.- С. 237–243.

60. Сидоров В.П., Советкин Д.Э. Эффективная мощность разнополярной дуги в аргоне с вольфрамовым электродом при сварке алюминия / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.-- –2020. –Т.23, № 1. –С.5-12.DOI:10.15593/2224-9877/2021.1.01

61. Сидоров В.П., Советкин Д.Э., Мельзитдинова А.В. Расчет температур в пластине по параметрам приведенного сварочного источника тепла / Сварка и Диагностика. –2020. – № 4. – С. 54–56.

62. Сидоров В.П., Худякова О. Ю. Точечная плазменная сварка тонкостенных конструкций из алюминия и алюминиевых сплавов / В сб. «Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения// II Международная теплофизическая школа, – Тамбов –1995. –С.95–97.

63. Способ наплавки трехфазной дугой /Сидоров В.П., Ковтунов А.И., Моторин К.В. Патент РФ № 2451584.Опубл. 27.05.2012. Бюл. №2.

64. Способ сварки трехфазной дугой/ Сидоров В.П., Короткова Г.М., Моторин К.В. / Заявка на изобретение № 2010149371/02 от 02.10.2010. МПК В23К 9/16. Опубл. 10.06.2012. Бюл. № 16.

65. Столбов В. И., Сидоров В.П. Сжатая трехфазная сварочная дуга Электродуговые генераторы плазмы и технологии / Отв. ред. М.Ф. Жуков и Г.А. Задворнев –Новосибирск: СО РАН. Ин-т теоретической и прикладной механики. –1997. С. 156 –170.

66. Столбов В.И., Короткова Г.М. Технология и оборудование для сварки трёхфазной дугой не плавящимися электродами. - Куйбышев: - КуАИ, 1984. - 81 с.

67. Столбов В.И., Осянкин Г.В., Сидоров В.П.; Сборка под сварку продольного шва тонкостенных труб/ Сб. науч. трудов: Технология производства сварных и паяных конструкций. Саратов, 1973 г., вып. 1. – С.3–7.

68. Столбов В.И., Иевлев В.А., Сидоров В.П., Осянкин Г.В. Распределение температуры при сварке глубоким проплавлением толстых листов из алюминиевых сплавов / Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 6. – С.28–30.

69. Столбов В.И., Сидоров В.П. Исследование устойчивости повторного возбуждения сжатой трёхфазной дуги. Автоматическая сварка. – 1979. – № 3. С.11–12, 18.

70. Столбов В.И., Сидоров В.П., Куркин И.П. Определение эффективной мощности источника нагрева при сварке плазменной трёхфазной дугой / Сварочное производство. – 1988. – № 5. – С.30–32.

71. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высш. шк. - 1988. - 559 с.

72. ТУ 2-034-22. Кругломер с унифицированной измерительной системой типа 1, класс точности 2, модель 1752211- 58с.

73. ТУ 6-21-12-94. Аргон высокой чистоты. ОАО Гипрокислород, 1994-16с.

74. Физика и техника низкотемпературной плазмы. - М.: Атомиздат, 1972. - 352 с.

75. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. - Киев: Техника, 1971.- 164с.

76. H.Jeong, K.Park, and J. Cho. Numerical analysis of variable polarity arc weld pool / Journal of Mechanical Science and Technology 30 (9) (2016) 4307-4313 DOI 10.1007/s12206-016-0845-7.

77. Jiang, Ch. Li, Sh. Chen. Experimental investigation on heat transfer of different phase in variable polarity plasma arc welding. Welding in the World (2019) 63: p.1153–1162

78. Keanini RG, Rubinsky B. Plasma arc welding under normal and zero gravity. *Welding Journal* 1990;69:41–50.
79. L.L. Wang, J.H. Wei, Z.M. Wang. Numerical and experimental investigations of variable polarity gas tungsten arc welding / *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 95 : 2421-2428.
80. Lucas W. TIG and plasma welding in the 80 s. Part 2. Process fundamentals-plasma and pulsed current // *Metall Constr.*-1982.-№10.- p.534-538.
81. Maruo H., Harata V., Koso M. Welding mild steel plate with pulsed plasma arc. *Itw. Dos. № IV-225-77. Osaka, 1977.*
82. Metcalfe JC, Quigley MBC. Heat transfer in plasma arc welding. *Welding Journal* 1975; 54:99–103.
83. Sipkes M.P .Pulsed-arc plasma for welding, in position // *Adv. weld. Process. Vol.1. Abington.*-1974.-p.105-112.
84. Tomsic M, Barhost S. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power. *Welding Journal* 1984; 63:25–32.